

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Zdravko Bedeniković

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Branko Bauer, dipl. ing.

Student:

Zdravko Bedeniković

Zagreb, 2016.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum: 19-09-2016.
Klasa: 602-04/16-613
Ur.broj: 15-1403-16-311

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Zdravko Bedeniković Mat. br.: 0035183809

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Mikrostrukturne greške u debelostijernim odljevima od nodularnog lijeva

Naslov rada na engleskom jeziku: Microstructural defects in heavy section ductile iron castings

Opis zadatka:

Pri proizvodnji debelostijernih odljeva od nodularnog lijeva mnoge se ljevaonice suočavaju s problemom pada mehaničkih svojstava zbog degeneracije grafita koja nastaje prvenstveno zbog dugog vremena skladištenja.

U okviru rada potrebno je nabrojati i opisati greške koje se javljaju pri ljevanju debelostijernih odljeva od nodularnog lijeva te navesti faktore koji uzrokuju pojavu tih grešaka. Posebno se osvrnuti na nastanak i umnožake nastanka chunky grafita.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je odliti odljevak oblika stošca dimenzija $\varnothing 300$ x 350 mm radi ispitivanja utjecaja dubljine stijenke, odnosno brzine hlađenja na morfologiju grafita i mehanička svojstva odljevka. Provesti metalografska i mehanička ispitivanja na pripremljenim uzorcima. Analizirati rezultate.

Zadatok izdane

23. studenog 2015.

Zadatok izdan:


Izv.prof.dr.sc. Branko Bauer

Roč predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2016.
2. rok (izvanredni): 23. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrade:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Branku Baueru dipl. ing. i asistentici dr. sc. Ivani Mihalic Pokopec na uputstvima i savjetima pri izradi ovog rada.

Zdravko Bedeniković

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. NODULARNI LIJEV	2
2.1 Osnovne značajke nodularnog lijeva	2
2.2 Kemijski sastav nodularnog lijeva.....	5
2.2.1 Ugljik i silicij	6
2.2.2 Mangan	8
2.2.3 Sumpor	9
2.2.4 Fosfor	9
2.2.5 Magnezij	9
2.2.6 Cerij.....	9
2.2.7 Ostali elementi u tragovima	10
3. MIKROSTRUKTURA NODULARNOG LIJEVA.....	11
3.1 Cijepljenje.....	13
4. PROBLEMI PRI LIJEVANJU DEBELOSTIJENIH ODLJEVAKA.....	16
4.1 Degeneracija grafita.....	16
4.2 Chunky grafit.....	19
4.2.1 Teorije tvorbe i rasta chunky grafita	19
4.2.2 Utjecaj na mehanička svojstva.....	23
4.2.3 Sprječavanje nastajanja chunky grafita.....	24
4.3 Uključci (nečistoće) koje nastaju u taljevini zbog kemijskih reakcija	26
4.3.1 Opis pogreške.....	26
4.3.2. Utjecaj na mehanička svojstva	26
4.3.3 Sprječavanje nastanka uključaka	27
4.4 Segregacija krhke faze.....	27
4.4.1 Opis pogreške.....	27
4.4.2 Utjecaj na mehanička svojstva.....	27

4.4.3 Sprječavanje nastanka segregacije krhke faze	28
5. EKSPERIMENTALNI DIO	29
5.1 Priprema taljevine nodularnog lijeva.....	30
5.2 Lijevanje	35
5.3 Ispitivanje kemijskog sastava bazne taljevine	36
5.4 Metalografska ispitivanja	38
5.4.1 Priprema uzoraka za metalografska ispitivanja	39
5.4.2 Ispitivanje mikrotvrdoće	43
5.5 Određivanje kemijskog sastava valjka	44
5.6 Ispitivanje mehaničkih svojstava.....	45
6. REZULTATI ISPITIVANJA.....	47
6.1 Kemijski sastav bazne taljevine.....	47
6.2 Rezultati metalografskih ispitivanja	47
6.2 Rezultati ispitane mikrotvrdoće.....	51
6.3 Rezultati kemijske analize	51
6.4 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava.....	53
7. ZAKLJUČAK	55
LITERATURA.....	56

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Mikrostruktura feritno – perlitnog nodularnog lijeva [1].....	2
Slika 2.2 Svjetska proizvodnja nodularnog lijeva u zadnjih 60 godina [2].....	3
Slika 2.3 Pregled svjetske proizvodnje lijevova za 2013. godinu [4]	4
Slika 2.4 Pregled proizvodnje odljevaka u Republici Hrvatskoj za 2013. godinu [4]	4
Slika 2.5 Ravnotežni dijagram stanja Fe - C-2,5 % Si [1]	6
Slika 2.6 Utjecaj udjela silicija i ugljika u nodularnom lijevu na strukturu i svojstva [1]	7
Slika 2.7 Preporučeni udio mangana u nodularnom lijevu, obzirom na Si i debljinu stijenke [1]	8
Slika 3.1 Normirane veličine grafitnih nodula u nodularnom lijevu [7].....	11
Slika 3.2 Mikrostruktura nodularnog lijeva različite nodularnosti (90, 80, 50 %) [7].....	12
Slika 3.3 (a) Utjecaj nodularnosti na mehanička svojstva nodularnog lijeva, (b) utjecaj udjela silicija (cjepivo) na broj nodula/mm ² za tri debljine stijenke [2]	14
Slika 3.4 Mikrostruktura feritnog (a) i perlitnog (b) nodularnog lijeva, povećanje 100x, nagriženo 4 %-tnim nitalom [8]	15
Slika 4.1 Otvorena austenitna ovojnica [12]	18
Slika 4.2 Austenitna ovojnica je djelomično zatvorena [12]	18
Slika 4.3 Morfologija chunky grafita (optički mikroskop) [12].....	20
Slika 4.4 Nastanak chunky grafita prema teoriji Liu i sur. [13].....	21
Slika 4.5 Shematski prikaz tvorbe degeneriranih oblika grafita prema Itofuji [13].....	22
Slika 5.1 CAD model odljevka	29
Slika 5.2 Srednje - frekventna indukcijska peć	30
Slika 5.3 Ispust bazne taljevine iz peći u Sandwich lonac	31
Slika 5.4 Shematski prikaz "Sandwich" postupka [1]	32
Slika 5.5 Cijepljenje u mlaz	33
Slika 5.6 Oblik i dimenzije lijevanih Y-proba (sukladno HRN EN 1563) [16].....	34
Slika 5.7 Mjesta uzimanja epruveta iz Y-proba za statičko vlačno ispitivanje [16]	34
Slika 5.8 Prenošnje taljevine u loncu i ulijevanje u pješčani kalup.....	35
Slika 5.9 Kalup neposredno nakon ulijevanja	36
Slika 5.10 ARL 3460- uređaj za ispitivanje kemijskog sastava	37
Slika 5.11 Uzorak za određivanje kemijskog sastava	37
Slika 5.12 Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“.....	38
Slika 5.13 Skenirajući elektronski mikroskop „Tescan Vega 5136 FM“	39

Slika 5.14 Odliveći dio valjka iz kojeg su odrezani uzorci za ispitivanja.....	40
Slika 5.15 Odrezani uzorak	40
Slika 5.16 Uređaj za izradu kalupa	41
Slika 5.17 Stroj za brušenje.....	41
Slika 5.18 Uređaj za poliranje uzorka	42
Slika 5.19 Pripremljeni uzorak.....	43
Slika 5.20 Uređaj za ispitivanje mikrotvrdoće	44
Slika 5.21 Uređaj za rendgensku fluorescentnu analizu, XRF, „Olympus DELTA Family Handheld XRF Analyzers“.....	45
Slika 5.22 Epruveta za statičko vlačno ispitivanje B 14 x 70 [7].....	46
Slika 6.1 Mikrostruktura uzorka od nodularnog lijeva, nagrizeno stanje	47
Slika 6.2 Mikrostruktura uzorka od nodularnog lijeva pri povećanju 100 x.....	47
Slika 6.3 Mikrostruktura uzorka od nodularnog lijeva, nagrizeno stanje, najveće povećanje .	48
Slika 6.4 Mikrostruktura promatranog uzorka od nodularnog lijeva	49
Slika 6.5 Mikrostruktura promatranog uzorka od nodularnog lijeva, veće povećanje.....	49
Slika 6.6 Mikrostruktura promatranog uzorka od nodularnog lijeva, najveće povećanje.....	50
Slika 6.7 Kemijski sastav uzorka izrezanog iz valjka	52
Slika 6.8 Kemijski sastav uzorka izrezanog iz valjka	52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Odnos između debljine stijenke i broja nodula [12].....	17
Tablica 2. Utjecaj čvorićastog grafita na vlačna svojstva i istežljivost nodularnog lijeva [12]	24
Tablica 3. Preporučene maksimalne dopuštene koncentracije pojedinih elemenata [4].....	28
Tablica 4. Sastav bazne taljevine	30
Tablica 5. Kemijski sastav nodulatora	32
Tablica 6. Kemijski sastav cjepiva	33
Tablica 7. Kemijski sastav bazne taljevine	47
Tablica 8. Mikrotvrdoća uzorka	51
Tablica 9. Prikaz mehaničkih svojstava ispitivanih odljevaka.....	53

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
CE	-	Ekvivalent ugljika
L_0	mm	Početna mjerna duljina epruvete
d_0	mm	Početni promjer epruvete
L_t	mm	Ukupna duljina epruvete
h	mm	Duljina glave epruvete
L_c	mm	Duljina vrata epruvete
A	%	Istezljivost
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
$R_{p,0,2}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
HV	HV	Tvrdoća prema Vickersu
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura
SEM	-	Skenirajući elektronski mikroskop

SAŽETAK

U radu je analiziran utjecaj debljine stijenke odljevka na mehanička svojstva nodularnog lijeva. Rad se sastoji od dva dijela: teorijskog i eksperimentalnog.

U teorijskom dijelu ukratko su objašnjena svojstva i primjena nodularnog lijeva. Također je prikazana i klasifikacija nodularnog lijeva, njegovo skrućivanje te utjecaj kemijskog sastava i mikrostrukture na mehanička svojstva lijeva. U radu su također prikazani rezultati proučavanja mehanizama tvorbe chunky grafitu te utjecajni faktori koji potpomažu njegovu tvorbu.

U eksperimentalnom dijelu rada ispitivan je utjecaj debljine stijenke na morfologiju grafitu i mehanička svojstva odljevaka od nodularnog lijeva kvalitete EN – GJS - 400 – 18. Odliveni su valjak dimenzija Ø 200 mm x 300 mm i Y – probe debljine stijenke 25 mm i 75 mm. Iz odlivenog valjka pripremljeni su po jedan uzorak za metalografska ispitivanja i ispitivanja mehaničkih svojstava. Za ispitivanje mehaničkih svojstava, iz Y- probe debljine 25 mm pripremljen je jedan uzorak, a iz Y- probe debljine 75 mm pripremljena su četiri uzorka. Na pripremljenim uzorcima provedena su metalografska ispitivanja i ispitivanja mehaničkih svojstava.

Na temelju dobivenih rezultata metalografskih ispitivanja i ispitivanja mehaničkih svojstava utvrđeno je da s porastom debljine stijenke odljevka dolazi do pojave nepoželjnog oblika degeneriranog grafitu- chunky grafitu, koji rezultira padom mehaničkih svojstava, vlačne čvrstoće i istezljivosti, dok na granicu razvlačenja pojava chunky grafitu nema gotovo nikakav utjecaj.

Ključne riječi: nodularni lijev, mikrostruktura, chunky grafit, mehanička svojstva, debljina stijenke

SUMMARY

This paper analyzes the influence of wall thickness on mechanical properties of ductile iron casting. It is composed of two parts: theoretical and experimental.

In theoretical part properties and application are briefly discussed. There is a overview of ductile iron classification, its solidification and the influence of chemical composition and microstructure on mechanical properties. This paper also gives an overview of the results of studying the mechanisms of formation chunky graphite and influential factors that promote its formation.

In the experimental part influence of different wall thickness and graphite morphology on ductile iron quality EN GJS 400 - 18 were tested. Cylinder Ø 200 mm x 300 mm and Y – probes 25 and 75 mm were casted. Two samples, one for metallographic tests and one for mechanical tests were prepared from molded cylinder. Also, one sample from Y- probes 25 mm and four samples from Y- probes 75 mm, were prepared for mechanical tests. Metallographic and mechanical testing were performed on that test samples.

On the basis of the obtained results from metallographic and mechanical tests, it was shown that the wall thickness increasement affects on formation of chunky graphite. Chunky graphite causes drop in tensile strength and elongation. Yield strength doesn't depend on the occurrence of chunky graphite.

Key words: ductile iron, microstructure, chunky graphite, mechanical properties, wall thickne

1. UVOD

U današnje vrijeme postoji velik broj tehnologija kojima se izrađuju predmeti koji se koriste u svakodnevnom životu, primjerice: obrada odvajanjem čestica, zavarivanje, deformiranje, kovanje, lijevanje i dr.

Lijevanje je jedan od najstarijih poznatih postupaka kojim su se dobivali predmeti željenog oblika. Spomenutim postupkom najprije se tali sirovina, metal ili legura pomoću toplinske energije, a zatim se taljevina ulijeva u kalupe željenog oblika pod utjecajem gravitacijske ili koje druge sile. Skrućivanjem u kalupu dobiva se željeni predmet. Visoka produktivnost i laka mogućnost izrade replika, čine ovu tehnologiju iznimno pogodnu za serijsku i masovnu proizvodnju. Često je i jedina tehnologija kojom se mogu izraditi neki vrlo složeni dijelovi.

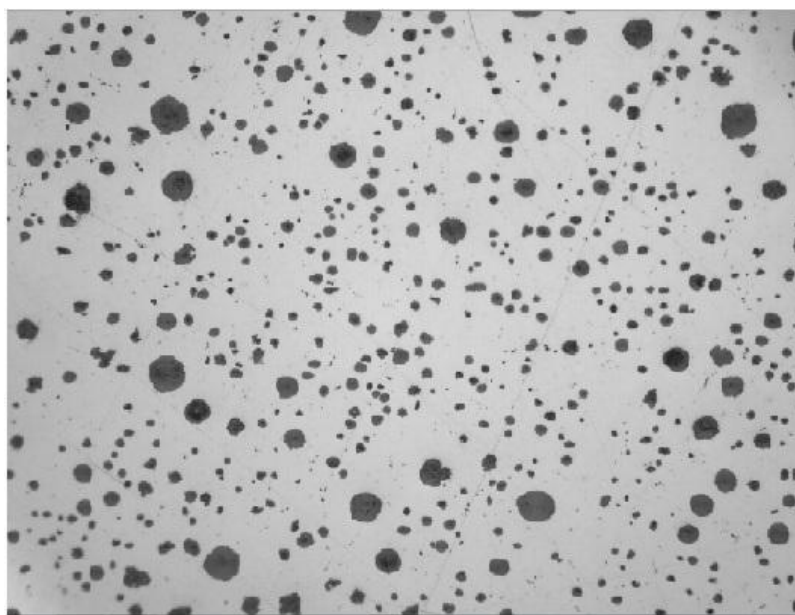
Ubrzan razvoj tehnologije tijekom 20. stoljeća pridonio je uveliko i razvoju ljevarstva. Sve do 19. stoljeća ljevarstvo karakterizira individualna proizvodnja, gdje dominira pojedinac. Početkom 20. stoljeća konstruirana je peć za taljenje – kupolka, koja donosi promjene i omogućuje serijsku proizvodnju.

2. NODULARNI LIJEV

2.1 Osnovne značajke nodularnog lijeva

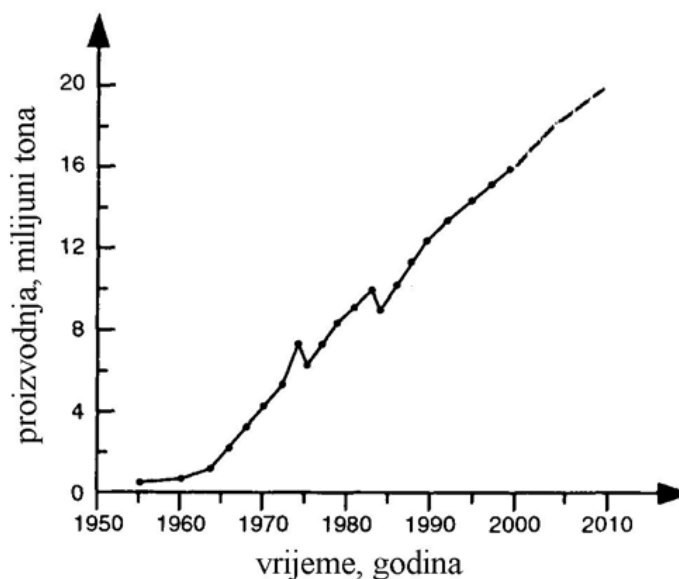
Žilavi ili nodularni lijev je vrsta željeznog lijeva kod kojeg je ugljik izlučen u obliku grafita. Izrazito je povoljnih svojstava zbog nodularnog oblika grafita.

Pri nodularnom obliku grafita nema zarezni djelovanja u osnovnoj mikrostrukturi lijeva. Karakterizira ga također i visoka istezljivost, visoka granica razvlačenja, dobra žilavost, livljivost i strojna obradivost, dok je vlačna čvrstoća na nivou vlačne čvrstoće čeličnog lijeva (vrijednosti vlačne čvrstoće se kreću od 350 MPa do 1500 MPa, ovisno o legiranju i toplinskoj obradi). Zbog povoljnih svojstava, nodularni je lijev u mnogim područjima primjene zamijenio sivi, čelični i temper lijev. Mikrostruktura feritno – perlitnog nodularnog lijeva prikazana je slikom 2.1.



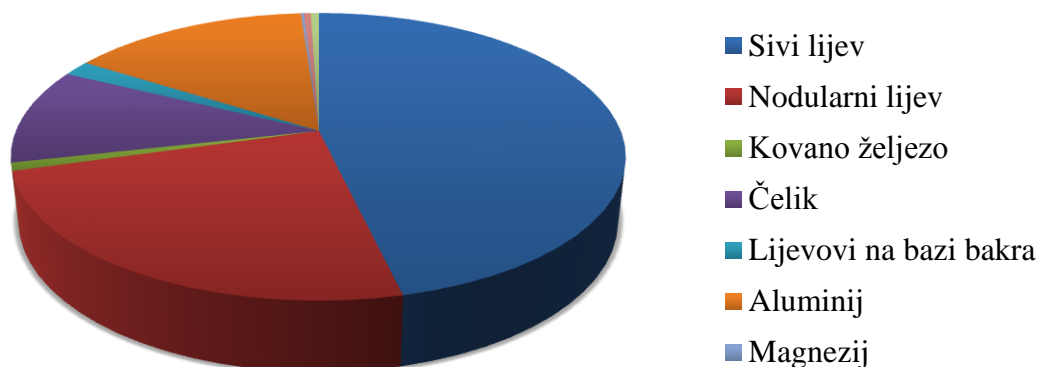
Slika 2.1 Mikrostruktura feritno – perlitnog nodularnog lijeva [1]

U sljedećih 20 godina, očekuje se još veći porast proizvodnje nodularnog lijeva. Svjetska proizvodnja nodularnog lijeva u zadnjih 60 godina prikazana je na slici 2.2. Povećana proizvodnja vjetroelektrana, upotreba spremnika za nuklearni otpad, izrada vodovodnih armatura (1/3 svjetske proizvodnje), automobilska industrija te industrija kamiona, doprinjeli su velikoj važnosti nodularnog lijeva.

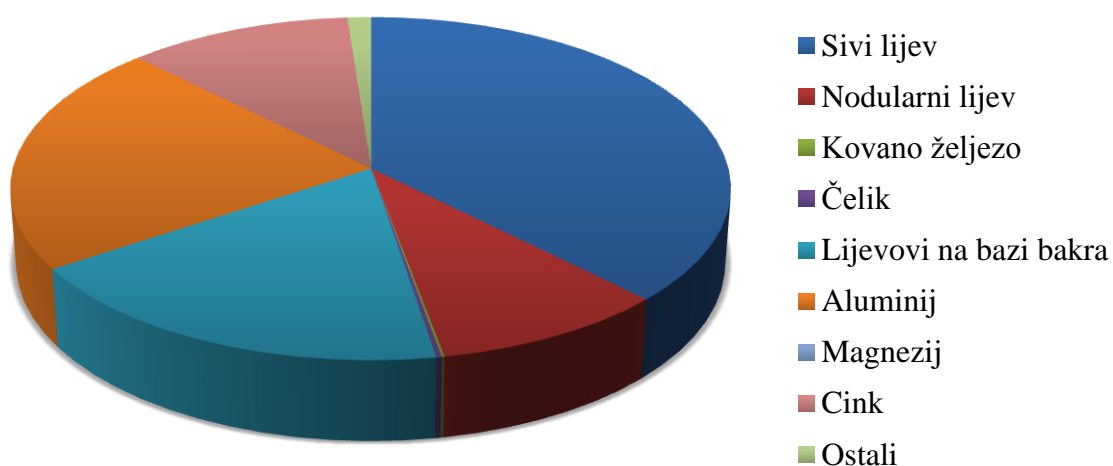


Slika 2.2 Svjetska proizvodnja nodularnog lijeva u zadnjih 60 godina [2]

Procjenjuje se da je ukupna svjetska proizvodnja nodularnog lijeva u 2003. godini bila veća od 16 milijuna tona. Tijekom 2005. godine proizvedeno je 19,6 milijuna tona nodularnog lijeva, što predstavlja 28,15 % od ukupne količine proizvedenih odljevaka. [3] Svjetski trend rasta proizvodnje odljevaka nastavlja se i u 2013. godini s 3,4 %. Pregled svjetske proizvodnje lijevova za 2013. godinu prikazan je slikom 2.3, dok je pregled proizvodnje u Republici Hrvatskoj prikazan slikom 2.4.



Slika 2.3 Pregled svjetske proizvodnje lijevova za 2013. godinu [4]



Slika 2.4 Pregled proizvodnje odljevaka u Republici Hrvatskoj za 2013. godinu [4]

U Republici Hrvatskoj, zahvaćenom gospodarskom krizom, proizvodnja nodularnog lijeva pala je sa 17375 t/god. (podaci iz 2010. godine), na 8600 t/god. (podaci iz 2013. godine). [4] Najvjerojatniji razlog pada je teška gospodarska kriza i sve veći gospodarski rast Kine, koja predstavlja glavnog konkurenta na svjetskom tržištu.

Razlog brzog rasta proizvodnih količina nodularnog lijeva su povoljna svojstva kao što su dobra livljivost, mogućnost površinskog kaljenja, visoki modul elastičnosti, povoljna čvrstoća, otpornost koroziji, dobra obradljivost i drugo.

Najvažniji razlog sve veće proizvodnje nodularnog lijeva je povoljan omjer cijene i čvrstoće.

2.2 Kemijski sastav nodularnog lijeva

Kemijski sastav nodularnog lijeva razlikuje se od sastava sivog lijeva po tome što sadrži vrlo male količine magnezija (od 0,04 % do 0,08 %) ili cerija te ostale elemente rijetkih zemalja (La, Pr, Nd), koji se dodaju kako bi se grafit izlučio u obliku kuglica. [5]

Sadržaj sumpora znatno je niži nego kod sivog lijeva.

Približan kemijski sastav nodularnog lijeva [6]:

- 3,2 % do 3,8 % C
- 2,4 % do 2,8 % Si
- < 0,5 % Mn
- < 0,045 % P
- < 0,01 % S.

Ukoliko rastaljeni metal sadrži prevelike količine sumpora ili male količine antinodulatora (Al, As, Bi, Cd, Pb, Sb, Sn, Te, Ti, Zn), ugljik se neće izlučiti u obliku kuglica, već u listićavu obliku te neće nastati nodularni lijev, nego sivi lijev. [2, 6]

Struktura i svojstva nodularnog lijeva posljedica su brojnih čimbenika, a moguće ih je podijeliti u tri skupine:

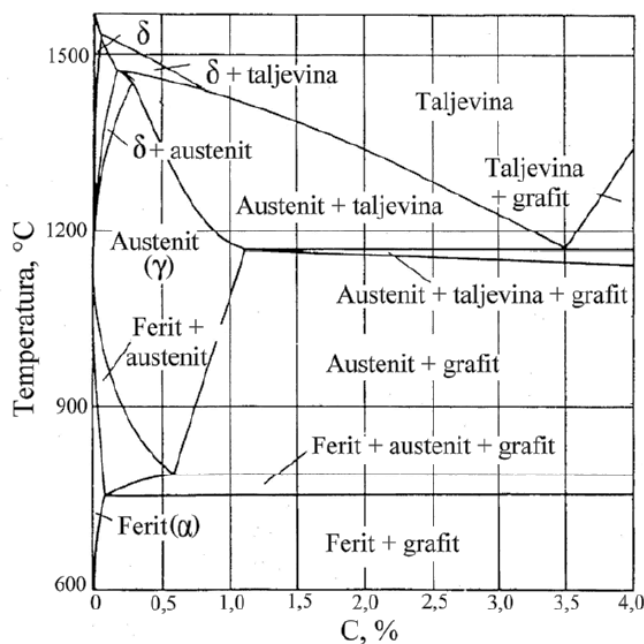
- metalurški procesi nad taljevinom
- kemijski sastav
- brzina hlađenja pri skrućivanju i hlađenju.

Na oblik grafita i strukturu metalne matrice znatno utječe kemijski sastav. Prema utjecaju na mikrostrukturu, kemijski elementi koji se pojavjuju u nodularnom lijevu mogu se podijeliti u skupine [1]:

- primarni elementi: C, Si, Mn, S, P
- nodulatori: Mg, elementi rijetkih zemalja (Ce, La,...)
- elementi koji utječu na matricu: Cu, Sn
- legirajući elementi: Ni, Mo
- karbidotvorci: Cr, V, B, Mo, Te
- nepoželjni elementi (antiglobulatori).

2.2.1 Ugljik i silicij

Ugljik zajedno sa silicijem treba biti u količini koja osigurava približan eutektički sastav lijeva (CE= 4,3 %). Prevelik sadržaj ugljika može uzrokovati isplivavanje kuglica grafita (flotaciju) kod debelostijenih odljevaka (iznad 50 mm). Kod tankostijenih odljevaka preporučuje se veći udio C jer se ne pojavljuje flotacija, a veći sadržaj ugljika poboljšava livljivost. [5] Od svih prisutnih elemenata, Si ima najveći utjecaj na sadržaj ugljika u eutektiku. Utjecaj silicija na Fe-C dijagram prikazan je na slici 2.5.



Slika 2.5 Ravnotežni dijagram stanja Fe - C-2,5 % Si [1]

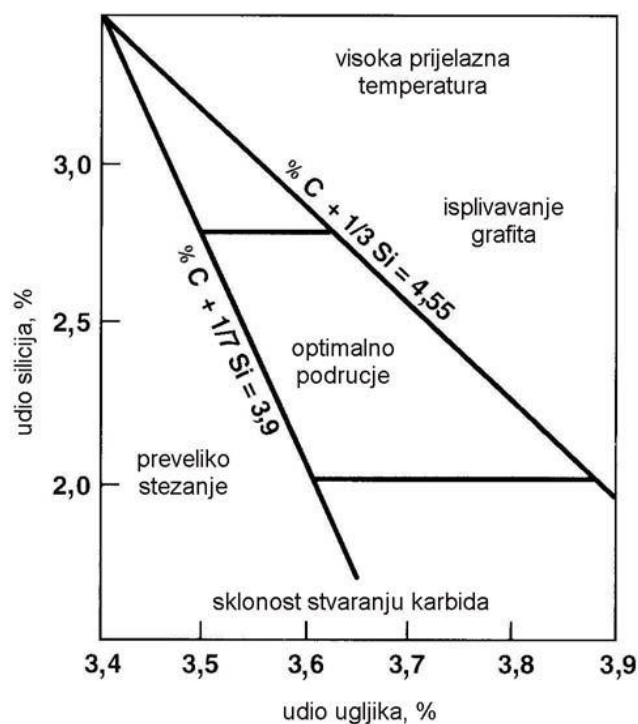
Povećanjem sadržaja silicija eutektik se pomiče ka nižim sadržajima ugljika (1 % Si snižava eutektički sastav za 0,31 % C). Za iskazivanje sastava nodularnog lijeva koristi se vrijednost ekvivalenta ugljika i stupnja zasićenosti.

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (1)$$

$$Sc = \frac{\%C}{4,26 - 1/3(\%Si + \%P)} \quad (2)$$

Kad je CE jednak 4,3, legura se smatra eutektičkom (< 4,3 % je podeutektička, veće od 4,3 % je nadeutektička).

Sadržaj ugljika neznatno utječe na mehanička svojstva, dok je udio silicija važan za postizanje strukture bez karbida. Utjecaj udjela silicija i ugljika na strukturu i svojstva nodularnog lijeva prikazan je na slici 2.6. [1]

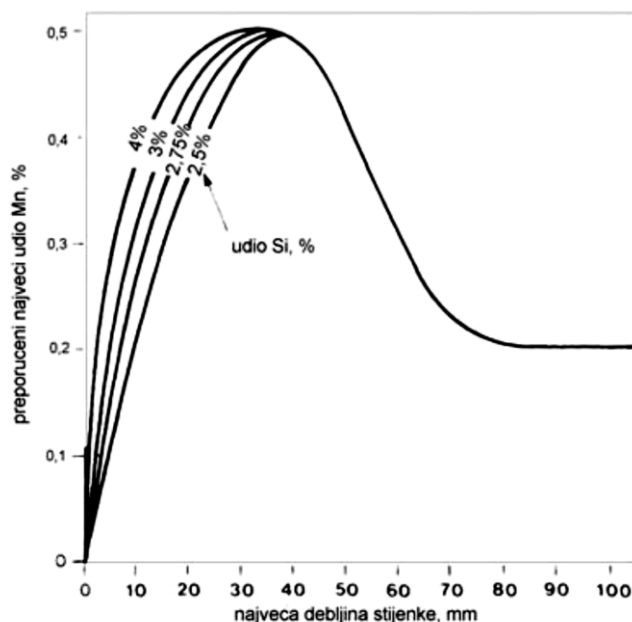


Slika 2.6 Utjecaj udjela silicija i ugljika u nodularnom lijevu na strukturu i svojstva [1]

Udio ugljika u nodularnom lijevu najčešće je između 3,4 % i 3,9 %, a ovisi o debljini stijenke odljevka (veće vrijednosti kod tanjih odljevaka – manje od 5 mm, a niže kod debljih – 50 mm). Silicij potiče stvaranje grafita, povišuje vlačnu čvrstoću, granicu razvlačenja, istezljivost feritnih vrsta nodularnog lijeva. Također snižava vrijednost udarnog rada loma i linearno povećava prijelaznu temperaturu krhkog loma. [1]

2.2.2 Mangan

Manji sadržaj mangana omogućuje postizanje velikog produljenja i smanjuje topljivost vodika (smanjuje opasnost od pojave površinskih pora). Mangan je također karbidotvorac i pospješuje stvaranje perlita. Udio mangana u nodularnom lijevu mora se kontrolirati u cilju izbjegavanja pojave karbida u lijevnanom stanju. Dozvoljeni udio mangana, koji je ovisan o udjelu silicija u lijevu i o debljini stijenke, prikazan je slikom 2.7. Kod debelostijenih odljevaka utjecaj mangana na stvaranje karbida ne može se kontrolirati sadržajem silicija jer mangan preferirano segregira u taljevinu koja zadnja skrućuje. Pri tome ne dolazi do stvaranja karbida po granicama zrna. [1]



Slika 2.7 Preporučeni udio mangana u nodularnom lijevu, obzirom na Si i debljinu stijenke [1]

2.2.3 Sumpor

Sadržaj sumpora u osnovnom željezu treba biti ispod 0,02 % (ukoliko je veća vrijednost, potrebno je odsumporavati). Spriječava izlučivanje kuglastog grafita na način da na sebe veže magnezij i cerij (osiromašuje taljevinu magnezijem i time pogoduje nastajanju listićavog grafita). Također pogoduje stvaranju uključaka u odljevcima. Prenizak udio sumpora nije poželjan jer tada taljevina loše reagira na noduliranje. [1]

2.2.4 Fosfor

Fosfor ne ometa izlučivanje grafita u obliku kuglica, ali jako smanjuje žilavost (uzrokuje krhkost). Smatra se nepoželjnim elementom i njegov udio treba biti što niži, po mogućnosti ispod 0,03 %. [2]

2.2.5 Magnezij

Magnezij taljevinu najprije dezoksidira, zatim odsumpori i tek onda se njegovo djelovanje usmjerava na oblikovanje kuglica grafita. Potrebna količina magnezija za stvaranje potpune nodularne strukture grafita je od 0,02 % do 0,06 %. Prilikom dodavanja magnezija u taljevinu, događa se burna reakcija zbog nižeg vrelišta magnezija (1090 °C) te je potrebno pripaziti. [2]

2.2.6 Cerij

Snažno dezoksidira i odsumporava taljevinu. S vrelištem iznad 3000 °C ne izaziva burnu reakciju prilikom dodavanja u taljevinu. Tvori stabilnije sulfide te se manje cerija gubi, a manja je i vjerojatnost od pojave uključaka. [1]

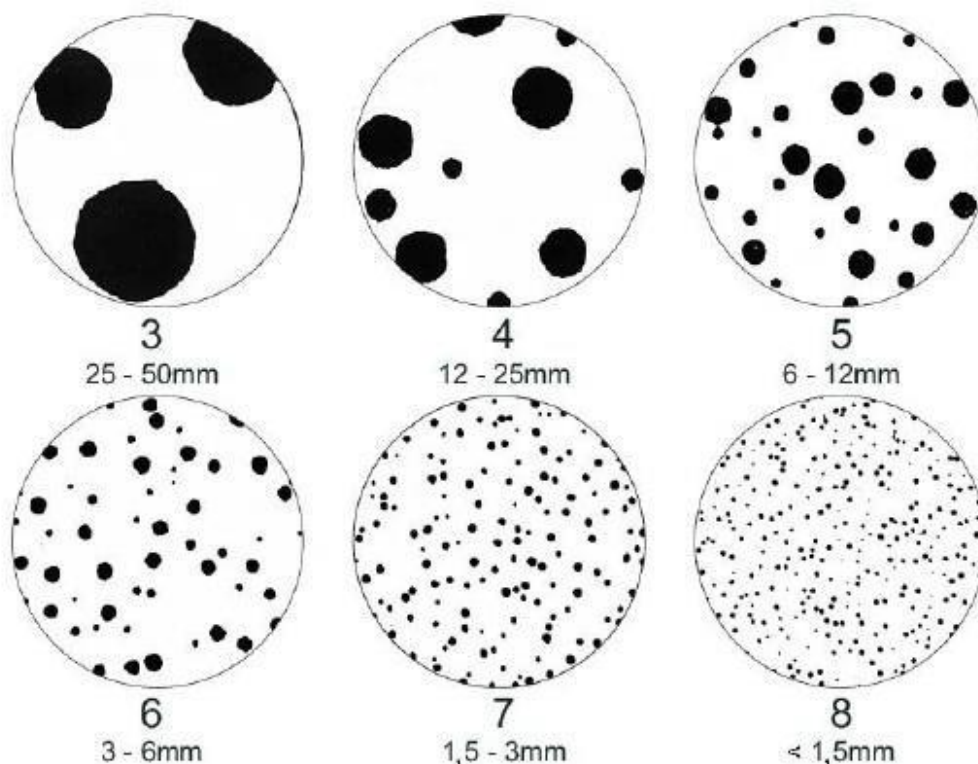
2.2.7 Ostali elementi u tragovima

Ostali elementi mogu biti prisutni tek u tragovima, ali mogu spriječiti izlučivanje kuglica grafitu. Štetan utjecaj tih elemenata može se kompenzirati dodatkom cerija. Elementi u tragovima (Al, As, Bi, Cd, Pb, Sb, Sn, Te, Ti, Zn), dolaze u taljevinu kroz sirovine, npr. boja ili emajl s otpadnog čelika, lem, maziva ili goriva u dijelovima otpadnih blokova motora, itd. Zbog toga je za proizvodnju nodularnog lijeva potrebno koristiti minimalno propisani udio kvalitetnog sirovog željeza. [2]

3. MIKROSTRUKTURA NODULARNOG LIJEVA

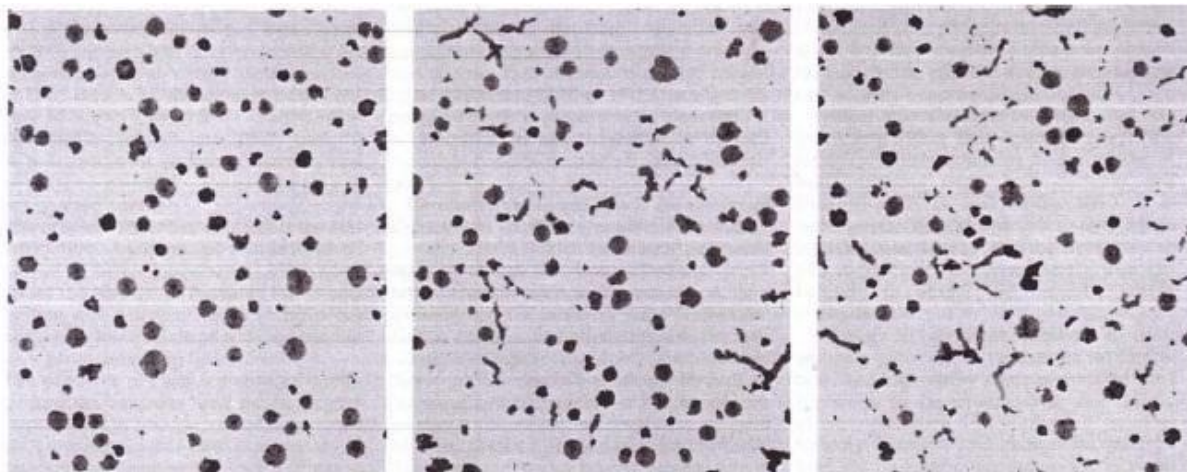
Nodularni lijev je legura približno eutektičog sastava. Eutektik koji nastaje prilikom skućivanja taljevine, može biti stabilan i metastabilan. Kod stabilne kristalizacije nastaju grafit i austenit, a kod metastabilne cementit i austenit. Postoji također treća mogućnost nastajanja mješane strukture austenita, grafita i cementita.

Brušenjem, poliranjem i nagrizanjem površine uzorka nodularnog lijeva te promatranjem takvog uzorka pod mikroskopom utvrđena je njegova mikrostruktura. Nakon brušenja i poliranja, pod mikroskopom su vidljive nakupine grafita. Količina i oblik grafita određeni su tijekom skućivanja i na njih se ne može utjecati naknadnom toplinskom obradom. Sva specifična mehanička svojstva nodularnog lijeva posljedica su pojave grafita u obliku kuglica, koje su više ili manje pravilnog oblika. Norma koja propisuje klasifikaciju oblika grafita (HRN EN ISO 945:2009) propisuje i normirane količine grafitnih nodula u nodularnom lijevu, uz povećanje 100 puta, pri čemu se promatraju najveće nodule u slici, prikazano slikom 3.1.



Slika 3.1 Normirane veličine grafitnih nodula u nodularnom lijevu [7]

Cilj je proizvesti lijev sa što većom nodularnošću, obično iznad 80 %, jer mehanička svojstva izrazito ovise o pravilnosti kuglica grafita. Mikrostruktura nodularnog lijeva različite nodularnosti, prikazana je slikom 3.2.



Slika 3.2 Mikrostruktura nodularnog lijeva različite nodularnosti (90, 80, 50 %) [7]

Vlačna čvrstoća i dinamička izdržljivost opadaju s porastom udjela nepravilnih oblika grafita, dok se granica razvačenja ne mijenja tako drastično. Oblik nepravilnog grafita je važan jer tanki listići grafita s oštrim rubovima uzrokuju značajan pad vlačne čvrstoće. Smanjena nodularnost utječe i na modul elastičnosti, snižava žilavost, povećava sposobnost prigušenja vibracija, povećava toplinsku vodljivost i smanjuje električni otpor. Osim obrade nodulatorima, taljevinu nodularnog lijeva potrebno je i cijepiti. [7]

3.1 Cijepljenje

Cijepljenje predstavlja kemijsku modifikaciju taljevine kojom se kontroliraju struktura i svojstva željenog lijeva putem minimizacije pothlađenja i povećanja aktivnih nukleusa tijekom skrućivanja. Cijepljenjem se ne unose u taljevinu nove čestice za nukleaciju grafita, već modificiraju postojeće da bi predstavljale aktivna mjesta za nukleaciju grafita. Cjepivo se dodaje u maloj količini u taljevinu željeznog lijeva neposredno prije ili za vrijeme lijevanja taljevine u kalup i osigurava odgovarajuće faze za nukleaciju grafita tijekom skrućivanja.

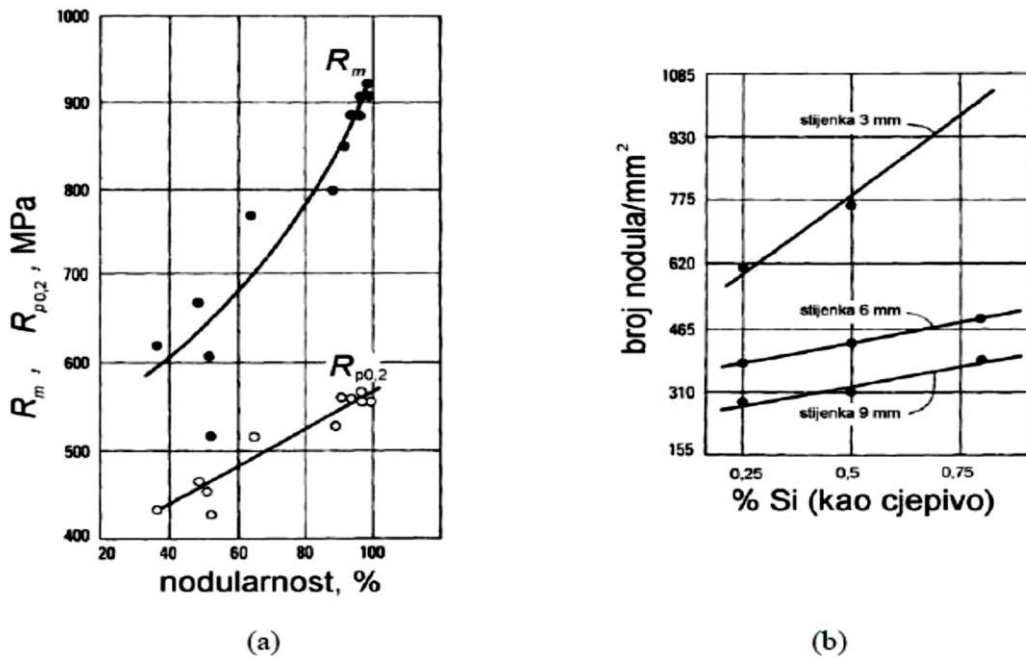
Kod većine vrsta nodularnog lijeva pojava metastabilnih eutektičkih karbida je nepoželjna, osim u slučaju kad se zahtijeva povećana otpornost na trošenje. Cijepljenjem se potiče stabilno skrućivanje, povećava se broj nodula i poboljšava nodularnost. Povećanjem broja nodula u lijevu otežava se nastajanje karbida i potiče stvaranje ferita (manja opasnost od krhkih odljevaka). Takvi odljevci imaju ujednačenu vlačnu čvrstoću, istezljivost, tvrdoću, obradivost obradom odvajanja čestica te ujednačena svojstva po presjecima.

Učinak cijepljenja je najveći neposredno nakon cijepljenja i pada s vremenom.

Brzina opadanja učinka cijepljenja ovisi o brojnim čimbenicima, a najvažniji su [7]:

- kemijski sastav cjepiva
- sastav taljevine u koju se dodaje cjepivo
- temperatura taljevine
- brzina hlađenja između likvidusa i solidusa.

Slikom 3.3 prikazan je utjecaj silicija, koji je dodan u taljevinu kao cjepivo, na broj nodula po jedinici površine za tri odljevka različite debljine stijenke. Pri porastu udjela grafita u mikrostrukturi dolazi do blagog pada vlačne čvrstoće, istezljivosti i gustoće nodularnog lijeva.



Slika 3.3 (a) Utjecaj nodularnosti na mehanička svojstva nodularnog lijeva,
(b) utjecaj udjela silicija (cjepivo) na broj nodula/mm² za tri debljine stijenke [2]

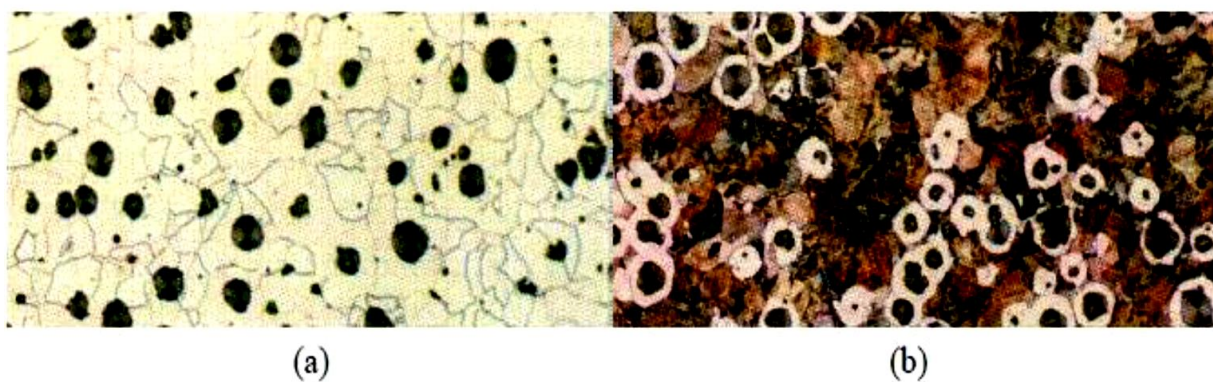
Metalna matrica nodularnog lijeva postaje vidljiva nakon što se izbrušeni i polirani uzorak nagriže nitalom.

Metalna matrica može biti:

- feritna
- perlitna
- feritno - perlitna
- austenitna.

Austenitni nodularni lijev se koristi u uvjetima tražene temperaturne otpornosti, otpornosti na koroziju i trošenje. U lijevanom stanju nodularni lijev ima najčešće kombinaciju feritno – perlitne metalne matrice.

Povećanjem udjela ferita u matrici, lijev ima nižu vlačnu čvrstoću, višu istezljivost, nižu žilavnost i višu prijelaznu temperaturu žilavo/ krhko. Slika 3.4 prikazuje mikrostrukture feritnog (a) i perlitnog (b) nodularnog lijeva, pri povećanju 100 puta, obje nagrižene 4 % nitalom.



Slika 3.4 Mikrostruktura feritnog (a) i perlitnog (b) nodularnog lijeva, povećanje 100x, nagriženo 4 %-tnim nitalom [8]

4. PROBLEMI PRI LIJEVANJU DEBELOSTIJENIH ODLJEVAKA

Proizvodnja nodularnog lijeva, kao relativno novog lijeva, premašila je 20 milijuna tona u zadnjih nekoliko godina. Mnogi konstruktori žele iskoristiti povoljna svojstva nodularnog lijeva.

Za proizvodnju dobrog odljevka od nodularnog lijeva, potrebno je obratiti pozornost na sve korake u proizvodnom procesu, od odabira pogodnih uložnih materijala do optimizacije punjenja kalupa, istresanja i hlađenja odljevaka. Također, iskustvo pri lijevanju takvih odljevaka je od iznimne važnosti. Mnogi ljevači koji posjeduju iskustvo, pogotovo kod lijevanja debelostjenih odljevaka od nodularnog lijeva, mogu utvrditi kritične faktore (odabir uložnih materijala, sastav taljevine, obrada taljevine i konstrukcija odljevaka) koji se moraju razmotriti da bi se proizveo odljevak zahtijevane kvalitete. [9]

Međutim, prisutna je određena doza nesigurnosti glede ukupnih svojstava takvih odljevaka, zbog pogrešaka koje se mogu pojaviti u strukturi, kao što su chunky grafit, uključci, odnosno nečistoće koje nastaju zbog kemijskih reakcija u taljevini i interčelijaste (intercelularne) krhke faze. [3]

4.1 Degeneracija grafita

Degenerirani oblici grafita često se pojavljuju u nodularnom lijevu, kao nepravilni oblici izlučenog grafita. Imaju vrlo štetan utjecaj na mehanička svojstva, posebno na vlačnu čvrstoću, istezljivost i dinamičku izdržljivost. Istraživanja su pokazala da se može očekivati pad vlačne čvrstoće za 20 % do 40 % te pad istezljivosti i udarne žilavosti do 50 %, ovisno o količini degeneriranog grafita u strukturi. [9]

U degenerirane oblike grafitu pripadaju [12]:

- vermikularni grafit
- eksplozirajući grafit
- zvijezdasti
- koraljni
- šiljasti
- chunky grafit.

Kod debelostijenih odljevaka, zbog dužeg vremena skućivanja ne nastaje nodularna morfologija, već grafit prelazi u neki od degeneriranih oblika. S povećanjem debljine stijenke (povećava se vrijeme skrućivanja), smanjuje se sposobnost nukleacije, što rezultira manjim brojem nodula. Tablicom 1 prikazan je odnos debljine stijenke i broja nodula.

Tablica 1. Odnos između debljine stijenke i broja nodula [12]

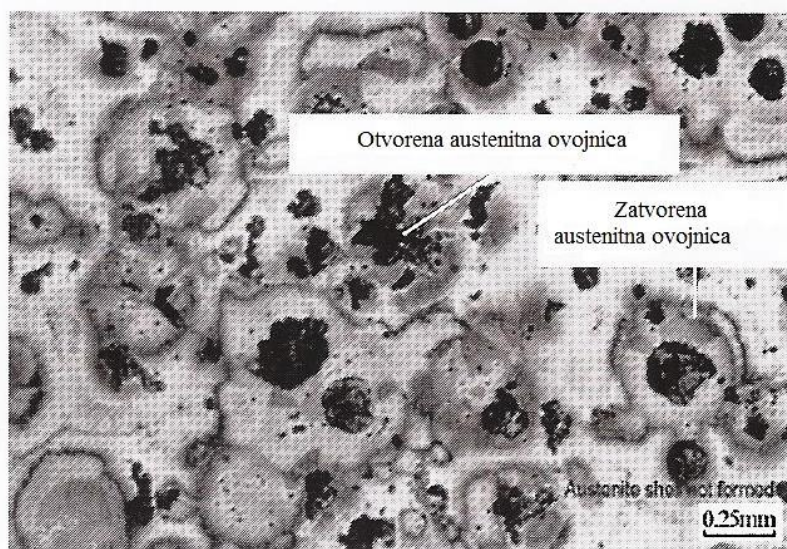
Debljina stijenke [mm]	Broj nodula [mm²]
3	800-1000
9	200-400
Ø30	150-200
Ø50	100-160
Ø100	60-100
Ø125	40-70
Ø300	10-30

Kao posljedica smanjenja broja nodula dolazi do porasta veličine nastalih nodula i opadanja udjela nodula idealno kuglastog oblika.

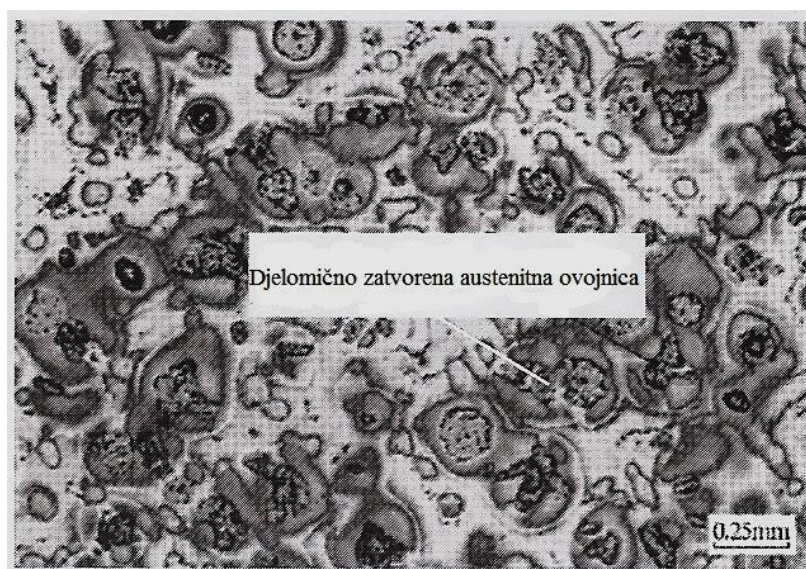
Glavni uzroci degeneracije grafitu su:

- malo termodinamičko pothlađenje zbog kojeg dolazi do osiromašnja ugljikom oko svake nodule
- narušavanje kretanja taljevine što rezultira tvorbom nodula manje kuglastog oblika
- sporo zatvaranja austenitne ovojnice ili otvorena austenitna ovojnica
- djelovanje elemenata u tragovima.

Sporo zatvaranje austenitne ovojnice uzrokuje nejednako taloženje ugljika na nodulama, zbog čega se gubi njihov idealno kuglasti oblik, što je prikazano na slici 4.1 i slici 4.2. Na slici 4.1 prikazana je otvorena austenitna ovojnica kod koje je grafit u kontaktu s taljevinom duže vrijeme te je oblik nodule degeneriran. Na slici 4.2 austenitna ovojnica je djelomično zatvorena te je oblik nodule djelomično degeneriran. [12]



Slika 4.1 Otvorena austenitna ovojnica [12]



Slika 4.2 Austenitna ovojnica je djelomično zatvorena [12]

Elementi u tragovima (štetni elementi), uz utjecaj na oblik izlučenog grafita, također utječu na omjer ferita i perlita te na sklonost metastabilnom skrućivanju. Takvi štetni utjecaji dokazani su za olovo, bizmut, antimon, kositar, arsen, aluminij, kadmij, srebro, uranij, galij, cink, telurij, talij, selenij, bor, indij, sumpor, fosfor, kisik, titan, vanadij, cirkonij, magnezij, cer, lantan, iritij i tarij. Netopljivi elementi kao što su olovo i bizmut, značajno utječu na tvorbu grafita. Štetni utjecaji započinju s nastajanjem crvolikih grafitnih uključaka, često neposredno pokraj idealno izgrađenih kuglica. Nakon prekoračenja graničnog udjela štetnih elemenata, dolazi do iznenadnog smanjenja stupnja tvorbe kuglica. Povećanjem udjela ostalih štetnih elemenata, nepovoljno utječe na nastanak nodularnog grafita. Pri većim udjelima štetnih elemenata nastaju čvoričasti, pahuljasti i zvijezdasti grafit.

Opseg štetnog djelovanja ovisi o brzini hlađenja, uz prisustvo štetnih elemenata. [11]

4.2 Chunky grafit

Chunky grafit je česta greška u debelostijenim odljevcima od nodularnog lijeva. Najčešće se javlja u toplinskom centru odljevka. Opasnost od tvorbe chunky grafita raste s povećanjem vremena skrućivanja, tj. što je debljina stijenke odljevka veća, to su vrijeme skrućivanja i količina nastalog chunky grafita veći. [12] Chunky grafit značajno utječe na mehanička svojstva odljevaka, zbog čega je potrebno izbjeći ili kontrolirati njegovo nastajanje.

Nastajanje chunky grafita često je istraživano područje, međutim, još uvijek nije u potpunosti istraženo i objašnjeno.

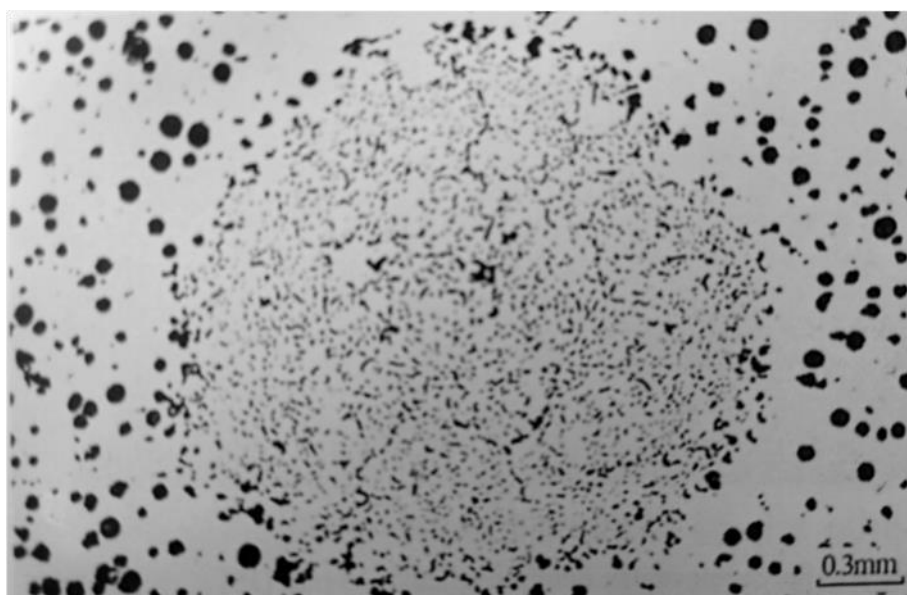
4.2.1 Teorije tvorbe i rasta chunky grafita

Do sada su provedena mnoga istraživanja, ali još uvijek ni jedna teorija tvorbe i rasta nije potvrđena. U nastavku su navedene i opisane neke od teorija nastanka chunky grafita.

4.2.1.1 Hartung, Knustad, Wardenær

Prema Hartungu, chunky grafit koji se nalazi u toplinskim čvorištima, pojavljuje se u interčelijastom obliku (rijeđe) ili u obliku eutektičnih ćelija. Oko chunky grafita nalazi se nodularan grafit. Chunky grafit može biti finiji (sitniji) ili grublji. Kratka udaljenost između pojedinih grafitnih čvorova rezultira kratkim putevima difuzije i pospješuje stvaranje ferita u područjima u kojima se nalazi chunky grafit.

Chunky grafit pojavljuje se u obliku mreže vrlo razgranatih i međusobno povezanih grafitnih niti, kao što je prikazano na slici 4.3.



Slika 4.3 Morfologija chunky grafita (optički mikroskop) [12]

4.2.1.2 Teorija „otkinutih komada“

Teoriju koju su postavili Karsay i Campomanes pripada jednoj od starijih teorija. [10]

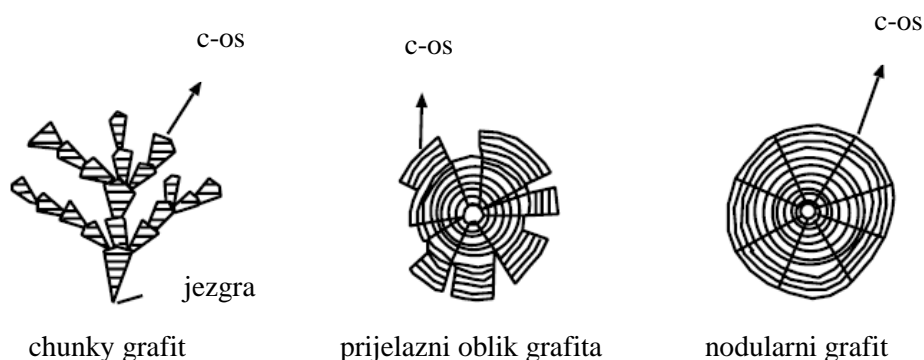
Teorija kaže da chunky grafit tvore komadi koji su otkinuti od nodularnog grafita te nakon toga odneseni u taljevinu gdje završavaju između dendridnih grana ili u područjima koja se posljednja skućuju, gdje onda nastaje chunky grafit.

Teorija se zasniva na Karsayevim istraživanjima koja su pokazala da nodularni i chunky grafit imaju istu radijalnu strukturu. Naknadna istraživanja, koja su obavljena skenirajućim

elektronskim mikroskopom, pokazuju da ova teorija nije zadovoljavajuća jer je utvrđeno da je chunky grafit često razgranat i da su te grane međusobno povezane faze koje se formiraju u ćelijasti oblik, a ne kao pojedinačni komadi grafita. [10]

4.2.1.3 Teorija piramidalnog rasta (Liu i suradnici)

P.C. Liu je sa suradnicima utvrdio da je rast chunky grafita sličan spiralnom rastu ravnine baze kristala grafita. Prema teoriji, chunky grafit je degenerirani oblik nodularnog grafita, koji vjerojatno nastaje zbog mikrosegregacija, osobito cerija. [10] Na slici 4.4 shematski je prikazan nastanak chunky grafita prema teoriji piramidalnog rasta. Chunky grafit nastaje zbog pojačanog grananja nodula. Chunky grafit je međusobno povezan, a može ga slomiti tok taljevine. [12]



Slika 4.4 Nastanak chunky grafita prema teoriji Liu i sur. [13]

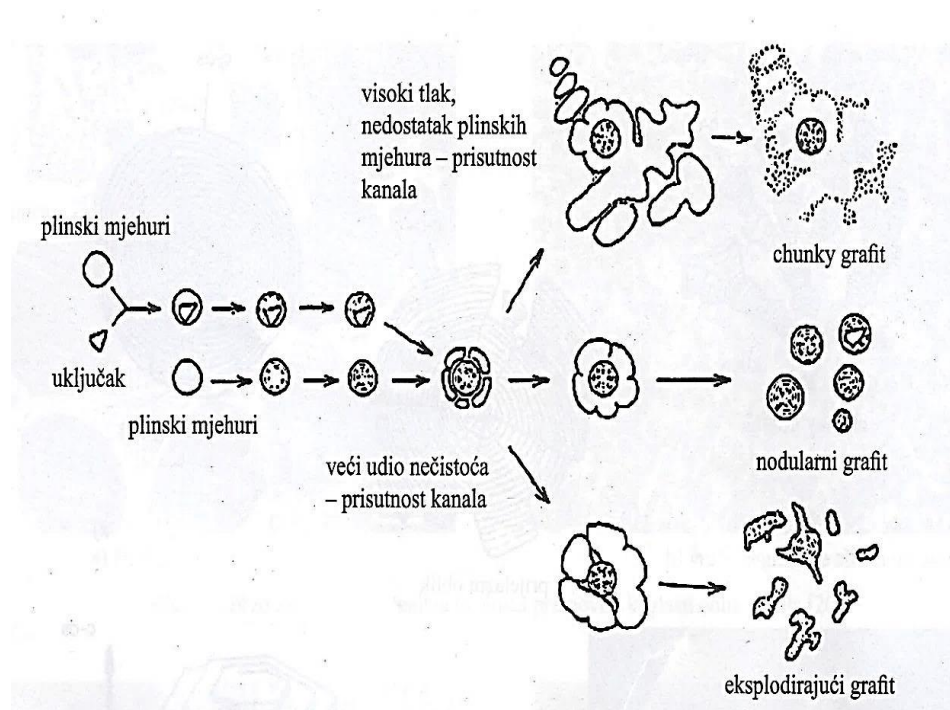
4.2.1.4 Nedostatak plinskih mjehurića magnezija (Itofuji)

Prema ovoj teoriji kao glavni uzrok nastanka chunky grafita navodi se nedostatak plinskih mjehurića magnezija raspoloživih kao slobodnih površina u taljevini.

Chunky grafit raste uzduž c-osi heksagonalnog grafitnog kristala. Itofuji smatra da spiralni rast ne postoji i da su strukture poput vermikularnog, koraljnog i chunky grafita zapravo iste.

Ova teorija, prikazana slikom 4.5, zasniva se na pronalasku segregiranog magnezija i silicija na polaznim mjestima za stvaranje chunky grafita. Zbog nedostatka plinskih mjehura magnezija,

rastući je grafit u kontaktu s preostalom taljevinom preko uskih kanala taljevine u austenitu. Mnogo je vjerojatnije da su kompleksni nemetalni uključci glavna mjesta za heterogenu nukleaciju grafita, a ne plinski mjehurići. [13]



Slika 4.5 Shematski prikaz tvorbe degeneriranih oblika grafita prema Itofuji [13]

4.2.1.5 Z. Zhang – ova teorija

Prema teoriji koju je postavio Z. Zhang, chunky grafit je interkristalni eutektički grafit koji nastaje na graničnoj površini austenit/ taljevina na kraju eutektičke reakcije. [14] Također, Z. Zhang ističe da je nastanje chunky grafita povezano s mikrosegregacijama. Smatra da osim Ce i Mg, chunky grafit promoviraju S i C. [10]

4.2.1.6 H. Roedter i M. Gagné teorija

Istraživanja koja su proveli H. Roedter i M. Gagné, pokazala su da se rast chunky grafita odvija spiralnim mehanizmom rasta na ravnini baze. Pojavljivanje chunky grafita u obliku niti s relativnom konstantnim promjerom pokazuje da je brzina rasta na ravnini prizme vrlo niska (približno 0). Ovakav spiralni rast zahtijeva snažne pokretačke sile. [10] Pokretačke sile mogu biti [9]:

- visoki ekvivalent ugljika, koji rezultira lokalnim prezasićenjem ugljikom. To pokreće trenutačnu precipitaciju atoma ugljika na ravnini baze kristala grafita sprječavajući postranični rast na ravnini prizme, što je potrebno za nastajanje nodularnog grafita.
- nizak nukleacijski potencijal zbog nedostatka kisika u preostaloj taljevine, što smanjuje broj pogodnih čestica za nukleaciju grafita, ili nedovoljno pothlađivanje koje smanjuje nukleacijski potencijal taljevine.

Oba slučaja rezultiraju visokim prezasićenjem ugljikom koje je potrebno za rast chunky grafita.

Rezultati istraživanja nisu pokazali povezanost chunky grafita s fenomenom mikrosegregacija/ makrosegregacija, niti su potvrdili bitnu ulogu cerija u stvaranju chunky grafita. [9]

Iz prikazanih teorija može se vidjeti da je svim teorijama zajedničko da chunky grafit raste u izravnom dodiru s taljevinom te da segregacija jednog ili više elemenata u toplim čvorištima pospješuje lokalno stvaranje chunky grafita prije umjesto nodularnog. [12]

4.2.2 Utjecaj na mehanička svojstva

Istraživanja su pokazala da je utjecaj chunky grafita na mehanička svojstva vrlo nepovoljan. Visokoisprepletena priroda niti chunky grafita u metalnoj matrici rezultira brzim padom istezljivosti (A) i vlačne čvrstoće materijala (R_m), što dovodi do ranog oštećenja duž područja chunky grafita. U svim istraživanjima koja su provedena, chunky grafit je pokazao vrlo mali utjecaj na granicu razvlačenja, što je primarno uzrokovano elastičnim ponašanjem feritne metalne matrice i ne ovisi o prirodi grafitnih čestica u nodularnom lijevu.

Istraživanjem se pokazalo da, ovisno o količini chunky grafita, vrijednost R_m i A_5 kod feritnih nodulanih lijevova mogu doseći od 25 % do 50 % vrijednosti lijevova bez chunky grafita, tablica 2. [12]

Tablica 2. Utjecaj chunky grafita na vlačna svojstva i istežljivost nodularnog lijeva [12]

VRSTA LIJEVA	R_m N/mm²	$R_{p0,2}$ N/mm²	A_5 %
GJS-400 s nodularnim grafitom	387	287	25
GJS-400 s prisutnim chunky grafitom	246	243	3

Istraživanja su također pokazala da chunky grafit utječe na dinamička svojstva odljevaka od nodularnog lijeva. Tako je U. Uribea u svojim istraživanjima pokazao da površina odljevaka prekrivena s do 25 % chunky grafita ima marginalan utjecaj na udarnu žilavost i dimaničku čvrstoću, dok se prema drugim studijama dinamička čvrstoća smanjuje za 25 % u prisutnosti chunky grafita. Ovi različiti rezultati mogu se povezati sa stvarnom mikrostrukturom odljevaka (količina chunky grafita) u područjima gdje je primjenjeno maksimalno naprezanje. [9]

4.2.3 Sprječavanje nastajanja chunky grafita

Kao jedan od glavnih uzročnika pojave chunky grafita smatra se porast vremena skućivanja, što je karakteristično za debelostijene odljevke. Na pojavu degeneracije utječe i kemijski sastav taljevine. Također je važan i utjecaj osnovnog materijala, kvaliteta cijepljenja i temperatura lijevanja. [12]

Gagné navodi kako je najefikasniji način za sprječavanje nastanka chunky grafita održavanje ugljičnog ekvivalenta što je moguće nižim u ovisnosti o karakteristikama odljevaka koji se proizvode. Visoki nukleacijski potencijal potrebno je održavati sve do kraja skućivanja. [9]

Ugljični je ekvivalent potrebno prilagoditi debljini stijenke i brzini skućivanja da bi se izbjegla flotacija. Idealno bi bilo da se ugljični ekvivalent nalazi u granicama od 4,3 % do 4,5 %. [10] Ljevaonice se rukovode različitim strategijama pri odabiru ugljičnog ekvivalenta,

ovisno o izvedbama punjenja kalupa, uljevnih sustava i pojila, ali je nužno da pronađu kompromis između visokog ekvivalenta ugljika koji promiče nodularnost i nižeg, koji sprječava flotaciju.

Löblich je zajedno sa suradnicima došao do rezultata koji upućuju da chunky grafit nastaje u toplinskim centrima odljevaka, u područjima osiromašenima klicama, u obliku velikih povezanih eutektičkih ćelija, smještenih pored grafitnih nodula. Razlog je cerij u suvišku. Naime, djelovanje cerija odgađa ili sprječava stvaranje klica. Tako se lokalno produžuje vrijeme hlađenja. Posljedica dužeg hlađenja je razgranat rast relativno velikih heksagonalnih grafitnih ploča chunky grafita. [15]

Istraživanjima je pokazano da Ni povećava i smanjuje sklonost nastajanja chunky grafita u debelostijenim odljevcima od nodularnog lijeva. Takvo ponašanje Ni može se povezati s udjelom Ni u taljevini i metodom obrade.

Kontrolirani dodatak Sb, Sn, Mn i Cu pogoduje stvaranju perlita i prema tome sprječava stvaranje chunky grafita. Kod kvaliteta gdje se zahtijeva potpuno feritna metalna matrica, to djeluje negativno jer povišenje udjela perlita može imati štetan utjecaj na dinamičku izdržljivost i istežljivost materijala. Kod feritnih nodularnih lijevova izbjegava se upotreba perlitizacijskih elemenata ili se njihov udio drži niskim. Često se Sb dodaje kao element koji sprječava stvaranje chunky grafita vezivanjem elemenata rijetkih zemalja koji se nalaze u suvišku. U tom slučaju potrebno je pažljivo dozirati Sb, kako bi se postigli željeni rezultati. [10]

Također je istraživanjima pokazano kako se podizanjem temperature lijevanja iznad 1390 °C, smanjuje vjerojatnost nastanka chunky grafita, u odnosu prema lijevanju na nižim temperaturama. [10]

Cijepljenje također može utjecati na dobivanje kvalitetnih debelostijenih odljevaka bez chunky grafita. Preporuča se cijepljenje obaviti što kasnije, najbolje u kalupu ili uljevnom sustavu. [12]

4.3 Uključci (nečistoće) koje nastaju u taljevini zbog kemijskih reakcija

4.3.1 Opis pogreške

Uključci koji nastaju u taljevini zbog kemijskih reakcija su vrlo česte greške koje se pojavljuju u odljevcima od nodularnog lijeva.

Mogu se podijeliti u tri grupe:

- čestice pijeska
- čestice troske
- nečistoće koje nastaju u taljevini zbog kemijskih reakcija.

Čestice pijeska i troske taljevinu zahvaćaju tijekom lijevanja i egzogeni su materijali, a nečistoće koje nastaju u taljevini zbog kemijskih reakcija predstavljaju endogene čestice.

Nečistoće koje nastaju kemijskim reakcijama u taljevini sastoje se od ravnih listića oksida koji nastaju kada je površina taljevine izložena kisiku tijekom manipulacije taljevinom, u uljevnoj čaši, u uljevnom sustavu i / ili u kalupu.

Glavna razlika od nečistoća koja nastaju u taljevini zbog kemijskih reakcija i čestica troske je ta što čestice troske sadrže CaO. [9]

4.3.2. Utjecaj na mehanička svojstva

Uključci koji nastaju u taljevini imaju izrazito štetan utjecaj na mehanička svojstva. Mogu uzrokovati prijevremene lomove konstrukcije, što je vrlo opasno. Također djeluju na otpornost na udar i dinamičku čvrstoću. Kod ispitivanja uzoraka od izotermički poboljšanog nodularnog lijeva, uočeno je smanjenje otpornosti na udar za 50 % i dinamičke čvrstoće od 20 % do 50 %.

4.3.3 Sprječavanje nastanka uključaka

Računalnom simulacijom moguće je procijeniti količinu uključaka, odnosno nečistoća, koje nastaju zbog kemijskih reakcija u taljevini, ovisno o kemijskom sastavu taljevine (udjelu Mg, Si, S), temperaturi taljevine i izloženost kisiku. Uključke je teško izbjeći, a udjeli Mg i Si nemaju gotovo nikakav utjecaj na njihovo stvaranje. Najznačajniji utjecaj ima izloženost kisiku. Lijevanjem na višim temperaturama smanjuje se količina nastalih uključaka. Taj efekt je vidljiv samo u slučaju velikog izlaganja taljevine kisiku. [9]

4.4 Segregacija krhke faze

4.4.1 Opis pogreške

Segregacija tijekom skrućivanja rezultat je raspodjele elemenata na granici kruto/ tekuće. Ovisi o koncentracijama elemenata, brzini skrućivanja i nukleacijskom potencijalu taljevine. Zadnja dva parametra kontroliraju segregaciju u debelostijenim odljevcima od nodularnog lijeva, što rezultira interčelijastim segregiranim područjima.

4.4.2 Utjecaj na mehanička svojstva

Prisutnost interčelijskih krhkih faza, steodita i/ ili karbida, i često povezanog mikrostezanja, ima štetan utjecaj na istezljivost i dinamička svojstva. Nedavna istraživanja su pokazala da povećanjem udjela fosfora s 0,01 % na 0,04 % (uz V i Zr u istim granicama) smanjuje izduženje s 22 % na 16 % i udarnu radnju loma s 18 J na 6 J. Također se pogoršava strojna obradivost zbog tvrdih interčelijastih faza.

4.4.3 Sprječavanje nastanka segregacije krhke faze

Najbitnija stvar u sprječavanju nastanka segregacija je održavanje što je moguće nižeg udjela karbidotvornih elemenata, tablica 3.

Tablica 3. Preporučene maksimalne dopuštene koncentracije pojedinih elemenata [9]

ELEMENT	MASENI UDIO [%]	NAPOMENA
Bor	0,002	
Krom	0,05	Niži ako je Mn > 0,3 %
Mangan	0,3	0,2 % kod primjene na niskim temperaturama
Molibden	0,2	Izbjeći, ako je moguće, u izotermički poboljšanom nodularnom lijevu
Fosfor	0,03	Niži kod primjene na niskim temperaturama
Titan	0,05	
Vanadij	0,03	
Cirkonij	0,003	Potječe od cjepiva

U tablici 3 prikazani su preporučeni udjeli pojedinih elemenata koji formiraju interčelijaste krhke faze. Čak i pri tako niskim koncentracijama zahtijeva se što je moguće veći broj nodula, da bi se minimizirale segregacije tih elemenata.

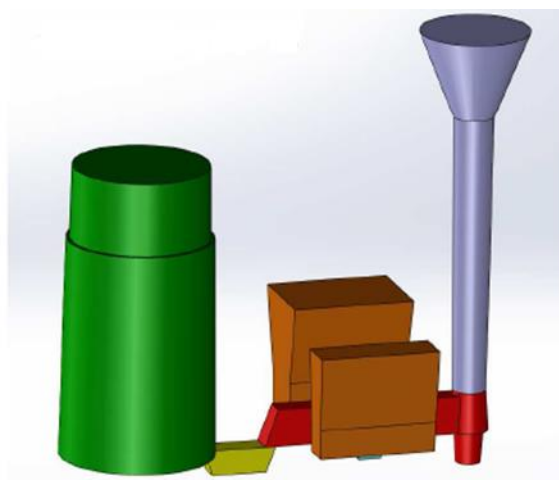
Preporučene količine nodula, u debelostijenim odljevcima od nodularnog lijeva, su 100 nodula/mm², dok se 50 nodula /mm² smatra apsolutnim minimumom.

Uložni materijal je također jedan od ključnih elementa za minimizaciju stvaranja segregacija, što je preliminarni zahtjev za proizvodnju debelostijenih odljevaka od nodularnog lijeva s visokom žilavošću. U skorim godinama, lijevaonice će morati što više pratiti sastav kupljenog čeličnog otpada da bi izbjegle probleme s elementima koji segregiraju po granicama čelija. [9]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U okviru ovog rada potrebno je ispitati utjecaj debljine stijenke, odnosno brzine hlađenja nodularnog lijeva kvalitete EN – GJS – 400 – 18, na mehanička svojstva i morfologiju grafita. Za potrebe ovog istraživanja odliveni su: odljevak u obliku valjka dimenzija \varnothing 200 mm x 300 mm i Y- probe debljine stijenki 25 mm i 75 mm.

CAD model odljevaka s uljevnim sustavom prikazan je na slici 5.1.



Slika 5.1 CAD model odljevka

Na tako odlivenim odljercima od nodularnog lijeva, provedena su:

- ispitivanja kemijskog sastava
- metalografska ispitivanja
- ispitivanja mehaničkih svojstava.

Izrada taljevine nodularnog lijeva i lijevanje uzoraka provedeno je u ljevaonici „Metalska industrija Varaždin“ d.d. u Varaždinu. Metalografska ispitivanja provedena su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, dok su ispitivanja mehaničkih svojstava provedena u „Metalskoj industriji Varaždin“ u Varaždinu.

5.1 Priprema taljevine nodularnog lijeva

Bazna taljevina za proizvodnju nodularnog lijeva izrađena je u srednje - frekventnoj indukcijskoj peći kapaciteta 5,5 t, slika 5.2.



Slika 5.2 Srednje - frekventna indukcijska peć

Metalni zasip bazne taljevine sastojao se od specijalnog sivog sirovog željeza (Sorel[®]), kružnog materijala (povrat), čelika, karburita, predlegure FeSi i karbosila (SiC). Sastav bazne taljevine nodularnog lijeva prikazan je tablicom 4.

Tablica 4. Sastav bazne taljevine

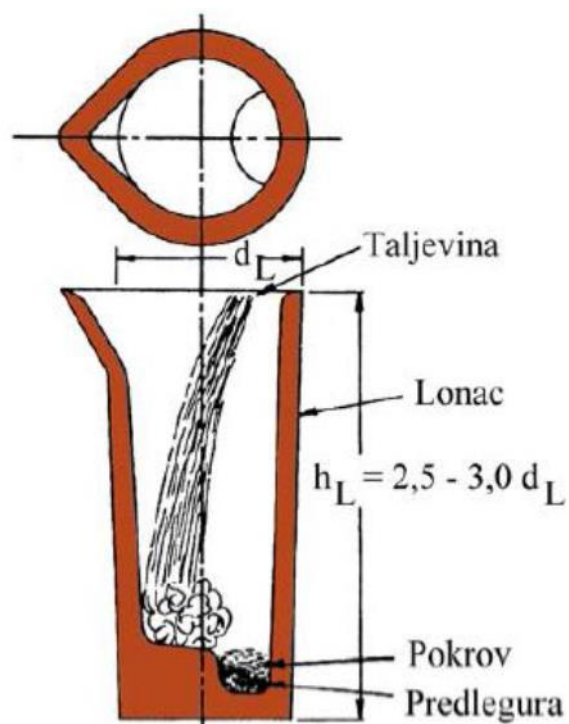
ULAZNA SIROVINA	%	MASA [kg]
SIVO SIROVO ŽELJEZO (SOREL [®])	70 %	4060
ČELIK	9 %	500
POVRATNI MATERIJAL	21 %	1220
FeSi	1 %	60
KARBURIT	0,05 %	3
SiC	0,20 %	15

Zatim je taljevina izlivena iz peći u lonac za obradu. Korišten je Sandwich postupak, odnosno postupak obrade u otvorenom loncu, slika 5.3.



Slika 5.3 Ispust bazne taljevine iz peći u Sandwich lonac

Sandwich postupak je najčešće primjenjivani postupak za proizvodnju nodularnog lijeva. Predlegura za obradu taljevine smješta se u džep na dnu predgrijanog lonca i pokriva se sitnom čeličnom strugotinom, shematski prikaz na slici 5.4. Za nodulaciju se koristila predlegura ELMAG 3717[®] (2 %) koja je izvagana prije smještanja u lonac i čelični pokrov. Do taljenja čeličnog pokrova i reakcije doći će tek kod određenog nivoa taljevine u loncu. Zadatak čeličnog pokrova je da onemogući reakciju između taljevine i predlegure, koja sadrži magnezij, odmah nakon ulijevanja prve taljevine u lonac. Na taj se način omogućuje veće iskorištenje magnezija.



Slika 5.4 Shematski prikaz "Sandwich" postupka [1]

Kemijski sastav upotrijebljenog nodulatora prikazan je u tablici 5.

Tablica 5. Kemijski sastav nodulatora

NAZIV SIROVINE	NAMJENA	Si %	Mg %	Ca %	Al %	RE %	Fe %
ELMAG 3717 [®]	nodulator	44-48	3,5-3,8	0,9-1,1	0,5-1,2	0,6-0,8	ostatak

Prilikom ulijevanja taljevine, u mlaz se dodaje cjepivo. Cijepljenje u mlaz prikazano je na slici 5.5.



Slika 5.5 Cijepljenje u mlaz

Korišteno je cjepivo ULTRASEED CE[®], količine 0,45 %, čiji je kemijski sastav dan u tablici 6.

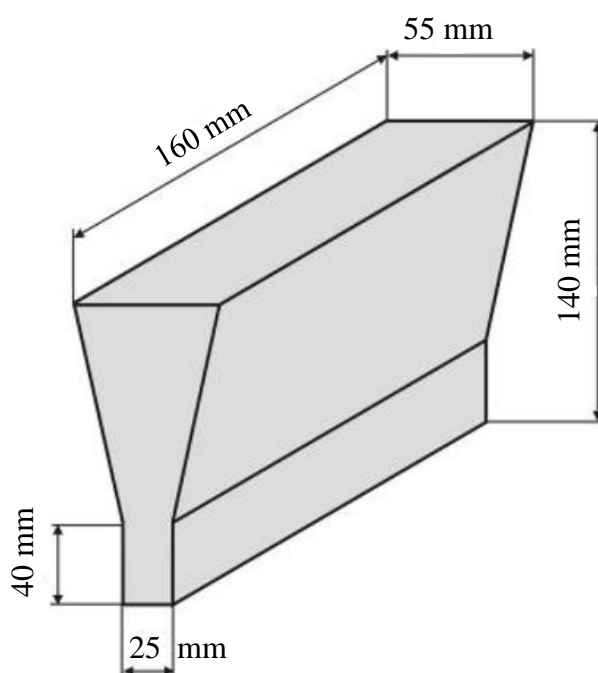
Tablica 6. Kemijski sastav cjepiva

NAZIV SIROVINE	Si %	Ca %	Al %	O i S %	Fe %
ULTRASEED CE [®]	70 - 76	1,5 - 2	0,75 - 1,25	> 1	ostatak

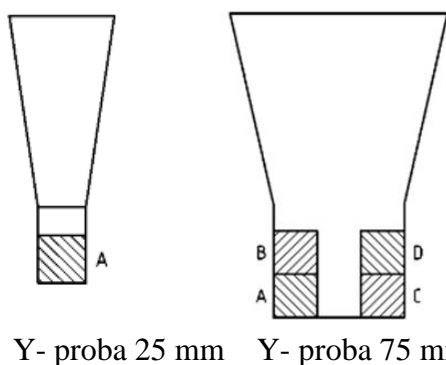
Prije ulijevanja u kalup napravljena je toplinska analiza ulijevanjem u standardizirane Quik - cup[®] čašice te je uzet uzorak taljevine za određivanje kemijskog sastava. Temperatura u loncu je bila 1480 °C, dok je temperatura lijevanja u kalup bila oko 1380 °C.

Kao ispitni uzorci odliveni su valjak dimenzija $\varnothing 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ i Y-probe debljine stijenke 25 mm i 75 mm. U jedan kalup smješteni su valjak i Y- probe 25 mm i 75 mm, kao što je prikazano na slici 5.1.

Norma HRN EN 1563 propisuje oblik i dimenzije Y-proba. Ova norma propisuje četiri različita tipa Y- proba. Sva četiri tipa Y- proba imaju isti oblik (konfiguraciju), a razlikuju se međusobno po dimenzijama. U okviru ovih istraživanja lijevani su: tip II Y- probe debljine stijenke 25 mm i tip IV Y- probe debljine stijenke 75 mm. Oblik i dimenzije lijevane Y-probe debljine stijenke 25 mm prikazani su na slici 5.6, a mjesta uzimanja epruveta iz Y- proba za statičko vlačno ispitivanje, prikazana su na slici 5.7.



Slika 5.6 Oblik i dimenzije lijevanih Y-proba
(sukladno HRN EN 1563) [16]



Y- proba 25 mm Y- proba 75 mm

Slika 5.7 Mjesta uzimanja epruveta iz Y-proba
za statičko vlačno ispitivanje [16]

Kalup za lijevanje valjka i Y- proba izrađen je CO₂ postupkom. Kalupna mješavina sastoji se od kvarcnog pijeska i anorganskog veziva, vodenog stakla (natrijev silikat), a priprema se u mješalici ili ručno. Nakon popunjavanja kalupnika ili jezgrenika, mješavina očvršćuje propuhivanjem plinom, ugljičnim dioksidom (CO₂).

5.2 Lijevanje

Nakon što je kalup za lijevanje ispitnih uzoraka izrađen, slijedi lijevanje. Lonac s taljevinom od nodularnog lijeva prenosi se do mjesta ulijevanja. Na slici 5.8 prikazano je lijevanje u pješčani kalup. Temperatura ulijevanja u kalup bila je oko 1380 °C.



Slika 5.8 Prenosenje taljevine u loncu i ulijevanje u pješčani kalup

Na slici 5.9 prikazan je kalup neposredno nakon ulijevanja.



Slika 5.9 Kalup neposredno nakon ulijevanja

5.3 Ispitivanje kemijskog sastava primarne taljevine

Kemijski sastav primarne taljevine ispitan je u ljevaonici Metalska Industrija Varaždin. Proba za određivanje kemijskog sastava lijeva se u bakrenu kokilu, zbog bržeg odvođenja topline. Uzorak za određivanje kemijskog sastava prikazan je na slici 5.11. Kemijski sastav taljevine određen je pomoću optičke emisijske spektrometrije s tinjajućim izbojem, na uređaju ARL 3460, koji je prikazan na slici 5.10. Ako kemijski sastav zadovoljava potrebne uvjete može se započeti s lijevanjem u kalup.



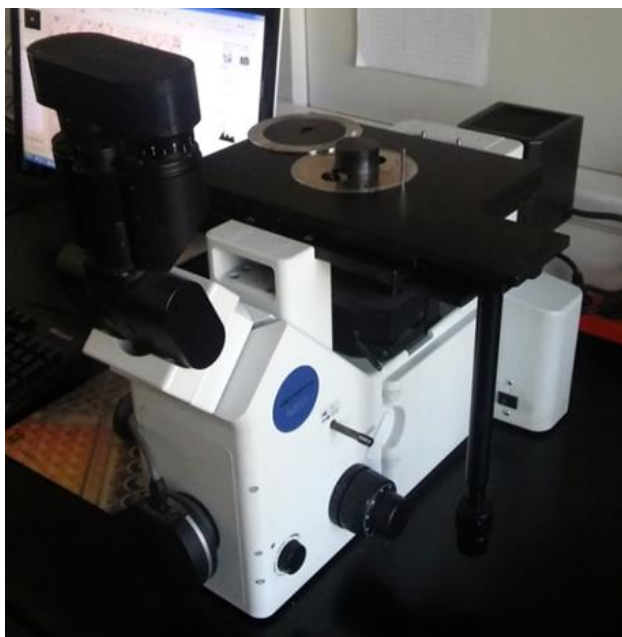
Slika 5.10 ARL 3460- uređaj za ispitivanje kemijskog sastava



Slika 5.10 Uzorak za određivanje kemijskog sastava

5.4 Metalografska ispitivanja

Metalografska ispitivanja provedena su na uzorku, koji je strojnom obradom pripremljen iz valjka. Metalografska ispitivanja napravljena su pomoću svjetlosnog mikroskopa „Olympus GX 51“ te pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa „Tescan Vega 5136 FM“, u Laboratoriju za materijalografiju, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“ prikazan je na slici 5.12.



Slika 5.11 Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“

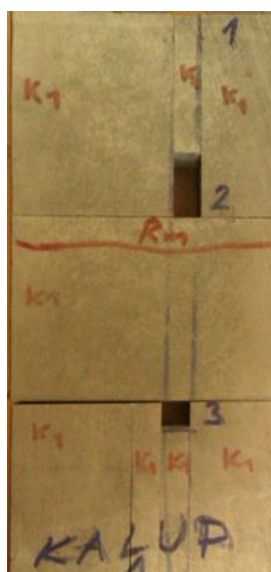
Skenirajući elektronski mikroskop, prikazan na slici 5.13, ima mogućnost znatno većeg povećanja u odnosu na svjetlosni mikroskop.



Slika 5.12 Skenirajući elektronski mikroskop „Tescan Vega 5136 FM“

5.4.1 Priprema uzoraka za metalografska ispitivanja

Kako bi se odabrani uzorci mogli metalografski ispitati, najprije ih je trebalo pripremiti. U prvom koraku izrezao se mali dio odlivenog valjka. Uzorak je izrezan u Laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a prikazan slikama 5.14 i 5.15. Uzorak je izrezan pomoću ručne pile kako bi se izbjeglo zagrijavanje i promjene u mikrostrukтури ispitivanog uzoraka.



Slika 5.14 Odliveni dio valjka iz kojeg su odrezani uzorci za ispitivanja



Slika 5.135 Odrezani uzorak

Standardni postupak pripreme uzorka sastoji se od:

- brušenja
- poliranja
- nagrivanja.

Izrezani uzorak odlivenog valjka zalijeva se u kalup kako bi se lakše promatrao pod mikroskopom. Nakon što je uzorak postavljen u kalup stroja, prikazanog na slici 5.16, dodaje se prah. Postoji više vrsta prahova, no ovdje se koristio crni prah, koji ima bolju vodljivost i omogućuje bolju sliku na elektronskom mikroskopu. U kalup stroja dodan je grijač te slijedi petnaestminutno zagrijavanje pri temperaturi od 150 °C i tlaku od 2,5 bara.



Slika 5.16 Uređaj za izradu kalupa

Nakon što se kalup ohladio, slijedi njegovo brušenje i poliranje. Uzorak je ručno brušen na stroju "Phoenix Alpha" proizvođača Buehler, prikazanog na slici 5.17.

Brušenje se izvelo voodootpornim brusnim papirima različite hrapavosti u 5 koraka s izmjenama papira, sljedećim redoslijedom:

- P320
- P500
- P1000
- P2000
- P4000

Brušenje se vršilo pri brzini od 300 min^{-1} , a kao sredstvo za hlađenje i čišćenje koristila se voda.



Slika 5.14 Stroj za brušenje

Poliranje uzorka napravljeno je na stroju "Struers DAP-V", prikazanog na slici 5.18, koji ima različite mogućnosti brzina vrtnje, od 0 pa do 600 min^{-1} . Za poliranje se obično koristi brzina od 150 min^{-1} , a kao sredstvo za hlađenje koristio se lubrikant – mješavina vode i alkohola.

Poliranje se odvijalo u dva koraka:

- U prvom koraku korištena je tkanina MD-DAC, a na tkaninu se nanijela dijamantna pasta debljine 3 mikrometra, koja se zatim razmazala po uzorku. Poliranje je trajalo 3 minute, a sila pritiskanja iznosila je 30 N.
- U drugom poraku korištena je tkanina MD-NAP, a na tkaninu se nanijela dijamantna pasta debljine 1 mikrometar. Poliranje je trajalo 3 minute, a sila pritiskanja je iznosila 25 N.



Slika 5.15 Uređaj za poliranje uzorka

Završna faza u pripremi uzorka je nagrivanje. Nagrivanje je izvršeno u 3 % nitalu, u trajanju od dvije sekunde.

Izgled pripremljenog uzorka prikazan je na slici 5.19.



Slika 5.16 Pripremljeni uzorak

5.4.2 Ispitivanje mikrotvrdoće

Kako bi odredili mikrotvrdoću uzoraka korištena je Vickersova metoda. Ispitivanje se provelo na tvrdomjeru u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a prikazan je na slici 5.20. Ova metoda temelji se na mjerenju veličine otiska koji je nastao nakon utiskivanja dijamantnog penetratora pod određenim opterećenjem. Penetrator je istostrana četverostrana piramida s kutom između stranica od 136° . Nakon toga pomoću mjernog uređaja mjere se duljine dijagonale baze piramide otisnute u materijalu. [19]

Za mjerenje mikrotvrdoće primjenjivana je sila utiskivanja od 1,96 N.



Slika 5.17 Uređaj za ispitivanje mikrotvrdoće

5.5 Određivanje kemijskog sastava valjka

Kemijski sastav valjka utvrđen je pomoću uređaja „Olympus DELTA Family Handheld XRF Analyzers“, prikazanog na slici 5.21. Analiza je provedena u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ova metoda bazira se na pobuđivanju atoma ispitivanog uzorka rendgenskim zračenjem, što rezultira emisijom fluorescentnog zračenja iz materijala. Te informacije daju nam kvalitetnu i kvantitativnu sliku o elementnom sastavu uzoraka. [20]

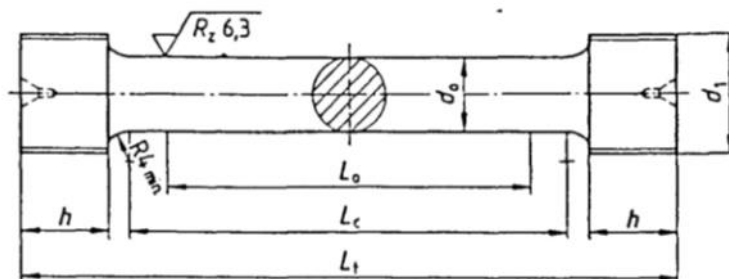


Slika 5.18 Uređaj za rendgensku fluorescentnu analizu, XRF, „Olympus DELTA Family Handheld XRF Analyzers“.

5.6 Ispitivanje mehaničkih svojstava

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je na kidalici vrste ZD-20, njemačkog proizvođača "Fritz Heckert" u laboratoriju "Metalske industrije Varaždin" d.d. Prema normi DIN 50125, pripremljene su: četiri epruvete iz Y- probe 75 mm, oblika A, B, C, D, jedna epruveta iz Y- probe 25 mm, oblika A i jedna epruveta iz valjka. Za pripremljene epruvete određena su sljedeća mehanička svojstva: vlačna čvrstoća, konvencionalna granica razvlačenja i istezljivost.

Na slici 5.22 prikazana je epruveta kružnog poprečnog presjeka, oblika i dimenzija B 14 x 70. Prema normi, početni promjer $d_0 = 14$ mm, a početna mjerna duljina $L_0 = 70$ mm. Ostale dimenzije prema normi su: M20, $h = \min. 17$ mm, $L_c = \min. 84$ mm, $L_t = \min. 125$ mm.



Slika 5.19 Epruveta za statičko vlačno ispitivanje B 14 x 70 [7]

6. REZULTATI ISPITIVANJA

6.1 Kemijski sastav bazne taljevine

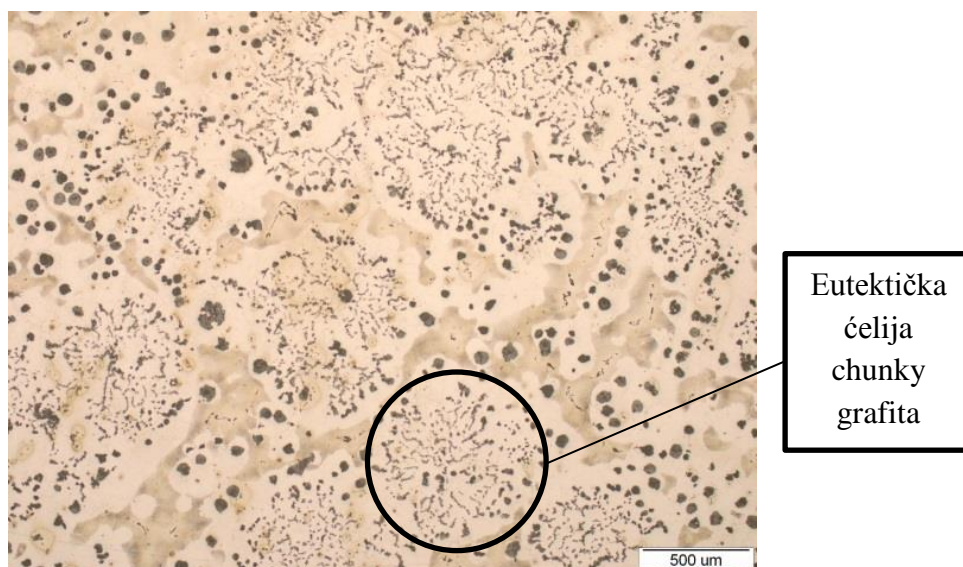
U tablici 7 prikazan je kemijski sastav bazne taljevine za proizvodnju nodularnog lijeva.

Tablica 7 . Kemijski sastav bazne taljevine

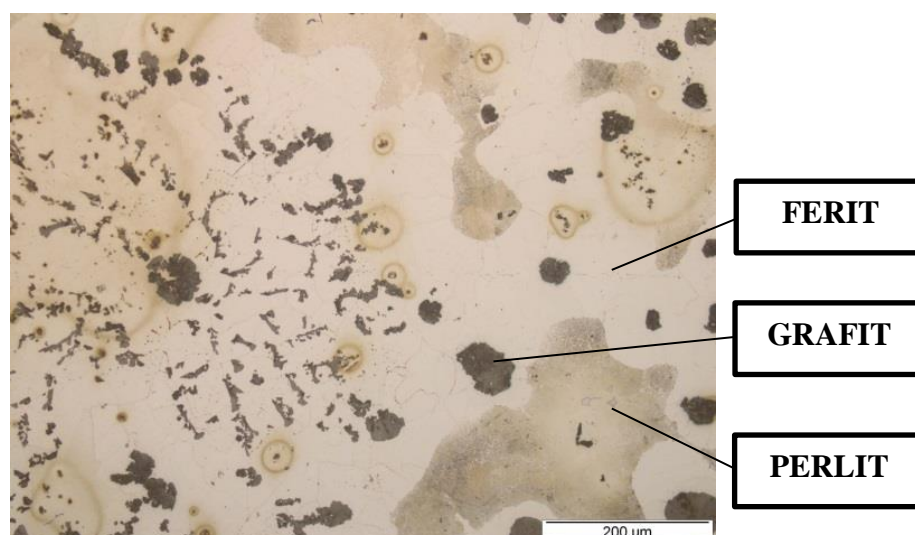
C %	Si %	Mn %	P %	S %	Mg %	Ni %
3,68	1,65	0,13	0,034	0,01	0,049	0,741

6.2 Rezultati metalografskih ispitivanja

Na slikama 6.1 do 6.3 prikazane su mikrostrukture uzorka pomoću svjetlosnog mikroskopa pri različitim povećanjima u nagrizenom stanju. Na slikama se jasno vide nodule grafita, perlit, ferit i chunky grafit koji se pojavljuje u obliku eutektičkih ćelija.



Slika 6.1 Mikrostruktura uzorka od nodularnog lijeva, nagrizeni stanje

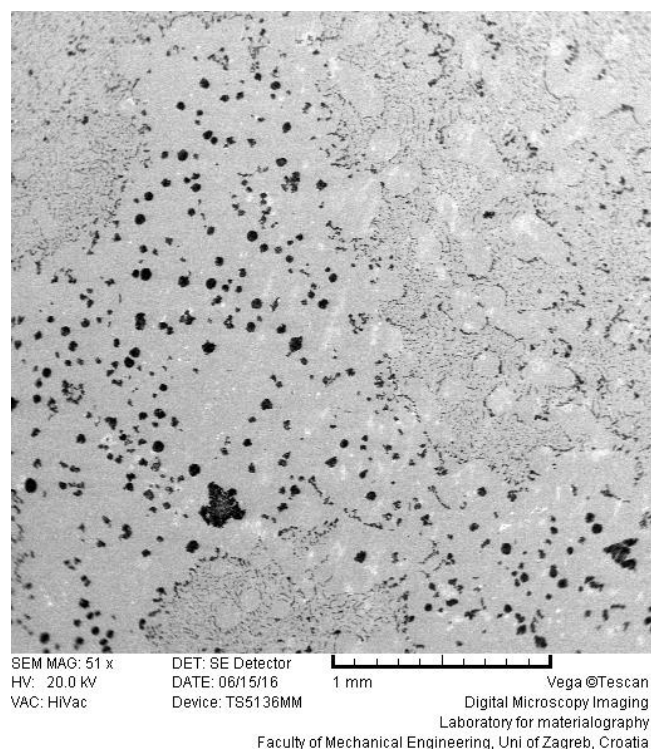


Slika 6.2 Mikrostruktura uzorka od nodularnog lijeva nagrizeno stanje, veće povećanje

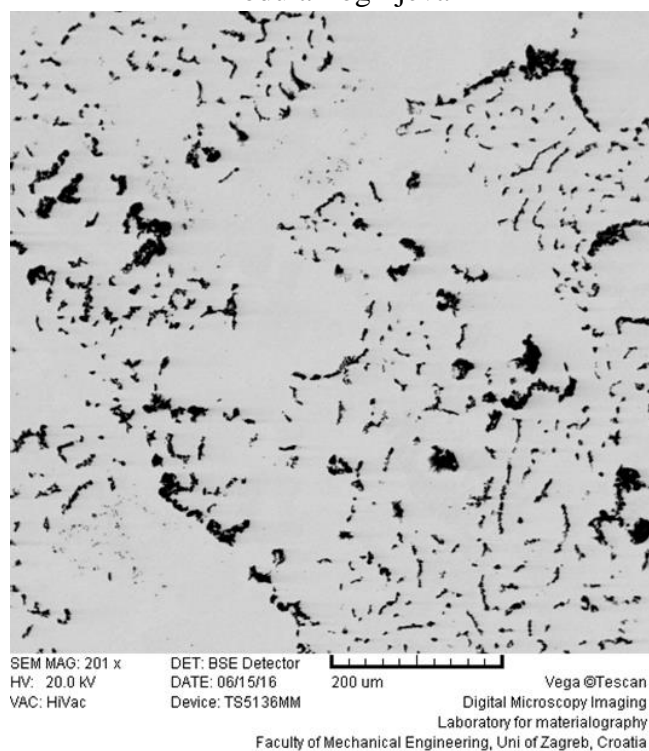


Slika 6.3 Mikrostruktura uzorka od nodularnog lijeva, nagrizeno stanje, najveće povećanje

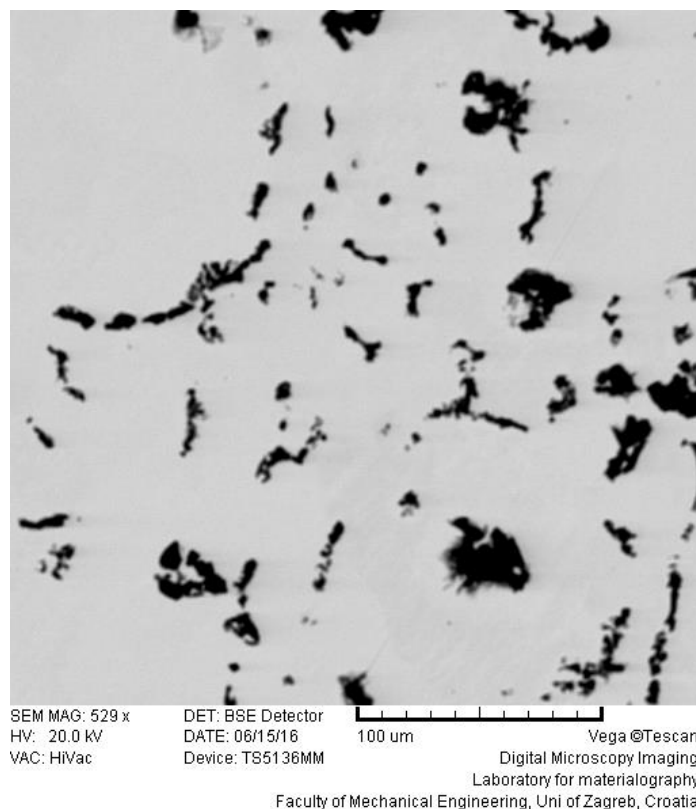
Uzorci su također promatrani pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa „Tescan Vega 5136 FM“. Dobivena mikrostruktura promatranog uzorka od nodularnog lijeva prikazana je slikama od 6.4 do 6.6.



Slika 6.4 Mikrostruktura promatranog uzorka od nodularnog lijeva



Slika 6.5 Mikrostruktura promatranog uzorka od nodularnog lijeva, veće povećanje



Slika 6.6 Mikrostruktura promatranog uzorka od nodularnog lijeva, najveće povećanje

Na dobivenim slikama mikrostrukture jasno se vidi da je došlo do degeneracije grafita i pojave jednog od oblika degeneriranog grafita - chunky grafita. Chunky grafit čini mreža razgranatih i međusobno povezanih niti grafitnih čestica. Iako izgleda da su te čestice razasute u metalnoj matrici, one su međusobno sve povezane unutar eutektičke ćelije. Ostatak strukture u okolnom području je uglavnom nodularan. Također se može uočiti da se po granicama eutektičkih ćelija chunky grafita on pojavljuje u grubom obliku.

Struktura je feritno - perlitna. Udio perlita nije izmjeren, ali prema podacima iz literature kreće se od 10 % do 15 %.

6.2 Rezultati ispitane mikrotvrdoće

Provedena su tri mjerenja mikrotvrdoće, a u tablici 8 prikazani su rezultati ispitivanja za promatrani uzorak.

Tablica 8. Mikrotvrdoća uzorka

Broj mjerenja	Mikrotvrdoća [HV0,2]
1	144
2	233
3	168

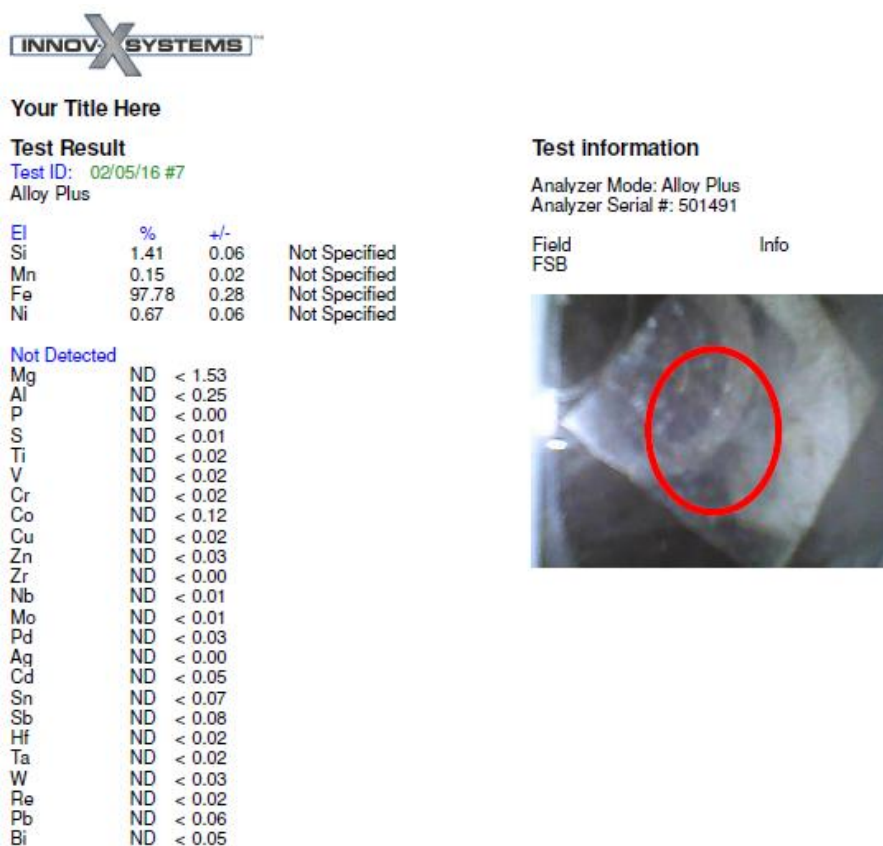
Iz gore navedene tablice dobiveno je da je prosječna mikrotvrdoća valjka 182 HV.

6.3 Rezultati kemijske analize

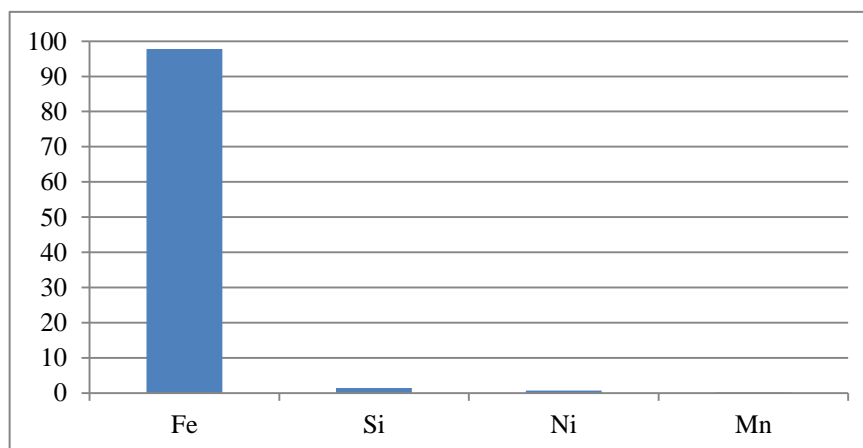
Kemijskom analizom uzorka od valjka, utvrđeni su sljedeći udjeli:

- 97,78 % Fe
- 1,41 % Si
- 0,67 % Ni
- 0,15 % Mn.

Na slici 6.7 i 6.8 prikazan je kemijski sastav uzorka izrezanog iz valjka.



Slika 6.7 Kemijski sastav uzorka izrezanog iz valjka



Slika 6.8 Kemijski sastav uzorka izrezanog iz valjka

Silicij i nikal imaju velik utjecaj na pojavu chunky grafita. Iz kemijske analize vidljivo je da je udio silicija 1,41 %, dok je udio nikla 0,67 %. Literatura navodi kako je poželjno da se udio silicija drži što bliže 2 % jer s porastom udjela silicija, raste i sklonost pojave chunky grafita.

6.4 Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava

Dobiveni rezultati mehaničkog ispitivanja prikazani su u tablici 9.

Tablica 9. Prikaz mehaničkih svojstava ispitivanih odljevaka

Uzorak	Oznaka uzorka	$R_{p0.2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	A_5 %
Y-proba 75 mm	A	325	456	18
	B	325	451	18
	C	325	443	25
	D	331	473	17
Y-proba 25 mm	A	331	453	20
Valjak		312	383	4

Iz rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava uzoraka A, B, C, D, Y- probe 75 mm, vidljivo je: prosječna vrijednost granice razvlačenja iznosi 326 N/mm², prosječna vrijednost vlačne čvrstoće iznosi 456 N/mm², dok prosječna vrijednost istezljivosti iznosi 19,5 %. Iz rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava uzoraka A, Y- probe 25 mm, vidljivo je: vrijednost granice razvlačenja iznosi 331 N/mm², vrijednost vlačne čvrstoće iznosi 453 N/mm² i vrijednost istezljivosti iznosi 20 %. Nadalje, iz rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava valjka, vidljivo je: vrijednost granice razvlačenja iznosi 312 N/mm², vrijednost vlačne čvrstoće iznosi 383 N/mm², dok vrijednost istezljivosti iznosi 4 %.

Usporedbom rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava Y- probe 75 mm s rezultatima ispitivanja mehaničkih svojstava Y- probe 25 mm, vidljivo je da su ti rezultati poprilično ujednačeni. Nadalje, ako se ti rezultati usporede s rezultatima ispitivanja mehaničkih svojstava valjka, vidljivo je da je kod valjka došlo do pada vrijednosti granice razvlačenja za 4 %, vlačne čvrstoće za 16 %, a istezljivosti za 80 %. Iz ovakvih rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava zaključuje se da s povećanjem debljine stijenke dolazi do pada R_m i A_5 zbog pojave chunky grafita u strukturi, što je u skladu s literaturom. Također, pojava chunky

grafita u strukturi pokazala je vrlo mali utjecaj na granicu razvlačenja, što je primarno uzrokovano elastičnim ponašanjem feritno – perlitne metalne matrice, kako navodi literatura.

7. ZAKLJUČAK

Proizvodnja debelostijenih odljevaka od nodularnog lijeva u stalnom je porastu. Da bi se ispunili određeni zahtjevi za te odljevke, moraju se minimizirati strukturne pogreške koje su sastavni dio debelostijenih odljevaka.

Navedene su razne teorije tvorbe i rasta chunky grafita uz koje su navedeni i faktori koji utječu na pojavu chunky grafita. Svim teorijama tvorbe i rasta chunky grafita zajednička je pretpostavka da chunky grafit raste u direktnom kontaktu s taljevinom i da segregacija jednog ili više elemenata pogoduje tvorbi chunky grafita prije nego nodularnog.

U radu su provedena metalografska ispitivanja i ispitivanja mehaničkih svojstava, uzoraka pripremljenih iz valjka te uzoraka pripremljenih iz Y- proba debljine 25 mm i 75 mm, s ciljem utvrđivanja utjecaja debljine stijenke, odnosno brzine hlađenja na morfologiju grafita i mehanička svojstva odljevaka. Iz analize mikrostrukture vidljivo je da je došlo do degeneracije grafita u uzorku pripremljenom iz valjka i da je nastao jedan od degeneriranog oblika grafita- chunky grafit. Chunky grafit čini mreža razgranatih i međusobno povezanih niti grafitnih čestica, koje su međusobno povezane unutar eutektičke ćelije. Ostatak strukture u okolnom području je uglavnom nodularan. Struktura metalne matrice je feritno – perlitna. Udio perlita nije izmjeren, ali prema podacima iz literature, kreće se od 10 % do 15 %. Iz ispitivanja mehaničkih svojstava debelostijenih odljevaka od nodularnog lijeva saznaje se kako chunky grafit djeluje na granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću i istezljivost. Vidljivo je da s povećanjem debljine stijenke dolazi do pojave chunky grafita, koji uzrokuje pad vlačne čvrstoće i istezljivosti. Chunky grafit pokazao je vrlo mali utjecaj na granicu razvlačenja, iz čega se može zaključiti da granica razvlačenja ne ovisi o prirodi grafitnih čestica u nodularnom lijevu, što je u skladu s literaturom.

LITERATURA

- [1] Glavaš, Z., Unkić, F.: Lijevanje željeznih metala, Sisak, 2008.
- [2] Žmak, I.: Modeliranje strukture i svojstva nodularnog lijeva neuronskim mrežama, Doktorski rad, Zagreb, 2007.
- [3] ... 47th Census of World Casting Production: Dividing Up The Global Market, [26.12.2015.]
- [4] ... 48th Census of World Casting Production: Steady Growth in Global Output, [26.12.2015.].
- [5] Grupa autora: Ljevački priručnik, Zagreb, 1985.
- [6] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjene materijala, Zagreb, 2011.
- [7] Ščurić, I.: Utjecaj debljine stijenke na mehanička svojstva nodularnog lijeva, Diplomski rad, Zagreb, 2014.
- [8] Dostupno na: <http://www.metallography.com/technotes/iron/nodular.htm>, [1.7.2016.]
- [9] Roedter, H., Gagné, M.: Mikrostrukturalne pogreške u debelostijenim odljevcima od nodularnog lijeva – nastajanje i utjecaj na svojstva, Ljevarstvo 51, (2009) 4, 101 – 109.
- [10] Hartung, C., Knustad, O., Wardnær, K.: Čvoričasti (chunky) grafit u odljevcima od nodularnog lijeva – teorije i primjeri, Ljevarstvo 50, (2008) 4, 99 – 106.
- [11] Hase, S: Pogriješke na odljevcima, Zagreb, 2003.
- [12] Mihalic, I., Unkić, F., Bauer, B.: Čvoričasti grafit u debelostijenim odljevcima- mehanizmi nastanka i utjecajni faktori, Ljevarstvo 55, (2013) 2, 37 – 68.
- [13] Källbom, R., Hamberg, K., Björkegren, L.E.: Chunky Graphite – Formation and Influence on Mechanical Properties in Ductile Cast Iron, Swedish Foundry Association, Göteborg Sweden.
- [14] Källbom, R., Hamberg, K., Wessén, M.: On the solidification sequence of ductile iron castings containing chunky graphite, Materials Science and Engineering A, 413 (2005) 346 - 351.
- [15] Löblich, H.: Einflüsse der Keimbildungsbedingungen auf die Entstehung von Chunky – Graphit in dickwandigem Gusseisen mit Kugelgraphit EN – GJS, Giesserei 93 (2006) 6.

- [16] Gojsević Marić, G., Žveglič, D., Terzić, K.: Utjecaj debljine stijenke na svojstva nodularnog lijeva namjenjena izotermnom poboljšanju, Ljevarstvo 54, (2012) 4, 101 -110.
- [17] Ferro. P., Lazzarin, P., Berto, F.: Fatigue properties of ductile cast ironcontaining chunky graphite, Materials Science and Engineering A, 554 (2012), 122-128.
- [18] Dostupno na: <https://www.coursehero.com/file/p3h3s5n/70-mm-Zugprobe-DIN-50125-B-14-70-Tabelle-3-Beispiele-f%C3%BCr-Ma%C3%9F-von-Zugproben/> [13.9.2016.].
- [19] Ivušić, V., Franz, M., Španiček, Đ., Ćurković, L.: Materijali I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
- [20] Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_fluorescence, [05.02.2016].